

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky



AUTOREFERÁT K DIZERTAČNÍ PRÁCI

Ostrava 2011

Ing. Martin Pieš

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky



Regulační model přehříváku páry a jeho ověření na
elektrárenském bloku 200 MW elektrárny
Dětmarovice

Autor: Ing. Martin Pieš

Školitel: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.

červen 2011

Abstrakt

Tato dizertační práce se zabývá modelováním regulačního obvodu výstupního přehříváku páry, jenž je součástí kotle černouhelné elektrárny Dětmarovice. Dynamické chování výstupního přehříváku páry je popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi přestupu tepla mezi dvěma médii.

Matematický model výstupního přehříváku páry lze namodelovat jako sériové spojení dvou typů soustav. Prvním typem soustavy je souproudý přehřívák páry popisující výměnu tepla mezi spaliny a párou skrz stěnu přehříváku. Druhým typem soustavy je matematický model výměny tepla mezi párou a materiálem potrubí, které je od okolního prostředí dokonale teplotně izolováno. Tato soustava, nazvaná v textu jako netopená plocha, slouží k technologickému navázání souproudého přehříváku páry na okolní prvky kotle, jakými jsou vstříky a další tepelné výměníky.

Je vytvořen simulační model regulace takto sestaveného výstupního přehříváku páry a výsledky simulace jsou ověřeny na reálných datech z provozu elektrárny. Jedním z aspektů použití matematického modelu přehříváku páry je zjištění vlivu obtížně měřitelných či neměřených signálů na dynamické chování skutečného kotle. Takovými signály jsou například teploty spalin u jednotlivých tepelných výměníků. Signál teploty spalin je na základě matematického modelu přehříváku páry se zadanými parametry modelu dopočten a je zjišťován vliv tohoto signálu na výstupní teplotu páry při různých parametrech modelu na straně spalin.

Klíčová slova

Matematický model, MATLAB, parciální diferenciální rovnice, přehřívák páry, soustava s rozloženými parametry, vstřík voda-pára.

Abstract

This dissertation thesis deals with modeling and simulation of control circuit of the output steam superheater which is a part of coal-fired boiler in Dětmarovice power plant. Dynamical behavior of the output steam superheater is described by partial differential equations for heat transfer between two media.

Mathematical model of the output steam superheater can be modeled as serial connection of two types of the systems. The first one is a concurrent steam superheater representing heat transfer between flue gas and steam through the superheater wall. The second type of the system represents mathematical model of heat transfer between steam and material of ideally isolated pipeline. This system referred to as an unheated area, serves for technological connections between steam superheater and surroundings components such as mixers and other heat exchangers.

The work includes creation of the control circuit for the output steam superheater and simulation results are verified by testing with the real operational data from the power plant. One of the aspects of use of mathematical model of steam superheater is determination of how the dynamical behavior of real boiler is affected by hardly measurable or non-measurable signals. Examples of such signals could be the flue gas temperatures of particular heat exchangers. The signal of flue gas temperature is calculated based on mathematical model of the superheater, followed by determination of how this signal affects the output stem temperature for various parameters of the flue gas.

Keywords

Mathematical model, MATLAB, partial differential equation, steam superheater, distributed-parameter system, mixer water-steam.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

c_1	[J/kg/K]	Měrné teplo páry při stálém tlaku
c_2	[J/kg/K]	Měrné teplo spalin při stálém tlaku
c_W	[J/kg/K]	Měrné teplo materiálu přehříváku (netopené plochy)
$D(T_p[i])$	[°C ²]	Rozptyl i-tého souboru dat signálu teploty $T_p(t)$
$D(T_1[L, i])$	[°C ²]	Rozptyl i-tého souboru dat signálu teploty $T_1(L, t)$
G	[kg/m]	Hmotnost materiálu teplosměnné plochy připadající na jednotku délky přehříváku (netopené plochy) ve směru x
h	[m]	Vzdálenost mezi řezy
h_p	[kJ/kg]	Entalpie páry
h_v	[kJ/kg]	Entalpie vody
J	[°C ²]	Ztrátová funkce
$K_v(t)$	[kg/s]	Časově proměnné zesílení virtuálního ventilu
L	[m]	Délka přehříváku (netopené plochy)
M_1	[kg/s]	Hmotnostní průtok páry přehřívákem (netopenou plochou)
M_2	[kg/s]	Hmotnostní průtok spalin podél přehříváku
M_p	[kg/s]	Hmotnostní průtok páry vstupující do vstříku
$MSEP$	[°C ²]	Kritérium kvality predikce
M_u	[kg/s]	Hmotnostní průtok směsi za vstřikem
M_v	[kg/s]	Hmotnostní průtok vody vstupující do vstříku
N	[–]	Počet řezů přehříváku (netopené plochy)
N_d	[–]	Počet dat ve statistickém souboru
n	[–]	Index řezu
O_1	[m]	Povrch teplosměnné plochy připadající na jednotku délky přehříváku (netopené plochy) ve směru x pro páru
O_2	[m]	Povrch teplosměnné plochy připadající na jednotku délky přehříváku (netopené plochy) ve směru x pro spaliny
p	[Pa]	Tlak
$R_p(\tau)$	[–]	Autokorelační funkce odtrendovaného bezrozměrného signálu teploty páry $T_p(t)$
$R_{p1(L)}(\tau)$	[–]	Vzájemně korelační funkce odtrendovaných bezrozměrných signálů $T_p(t)$ a $T_1(L, t)$
$T_1(0, t)$	[°C]	Teplota páry na vstupu přehříváku (netopené plochy)
$T_1(L, t)$	[°C]	Teplota páry na výstupu přehříváku (netopené plochy)
$T_1(x, t)$	[°C]	Teplota páry ve vzdálenosti x od začátku přehříváku (netopené plochy) v čase t

$T_1(x, t_\infty)$	[°C]	Ustálená teplota páry podél přehříváku (netopené plochy)
$T_2(0, t)$	[°C]	Teplota spalín na vstupu přehříváku
$T_{2v}(0, t)$	[°C]	Virtuální teplota spalín na vstupu přehříváku
$T_2(L, t)$	[°C]	Teplota spalín na výstupu přehříváku
$T_2(x, t)$	[°C]	Teplota spalín ve vzdálenosti x od začátku přehříváku v čase t
$T_2(x, t_\infty)$	[°C]	Ustálená teplota spalín podél přehříváku
T_{evs}	[°C]	Regulační odchylka teploty ve velké regulační smyčce
T_p	[°C]	Teplota páry vstupující do vstříku
T_u	[°C]	Teplota páry na výstupu vstříku
T_v	[°C]	Teplota vody vstupující do vstříku
T_{vII}	[°C]	Teplota vody za ventilem II
T_{vIIa}	[°C]	Teplota vody za ventilem IIa
$T_W(x, t)$	[°C]	Teplota stěny ve vzdálenosti x od začátku přehříváku (netopené plochy) v čase t
$T_W(x, t_\infty)$	[°C]	Ustálená teplota stěny podél přehříváku (netopené plochy)
T_{wms}	[°C]	Žádaná hodnota teploty malé smyčky
T_{ukor}	[°C]	Korekce žádané hodnoty teploty za 2. vstříkem
T_{wvs}	[°C]	Žádaná hodnota teploty velké smyčky
T_{wvskor}	[°C]	Korekce teploty přehřáté páry
t	[s]	Čas
t_a	[s]	Časové posunutí použité při výpočtu signálu $T_{2v}(0, t)$
t_k	[s]	Diskrétní časový okamžik
t_s	[s]	Perioda vzorkování
UD	[—]	Podíl chyby rušení
UM	[—]	Podíl chyby posunutí
UR	[—]	Podíl chyby regrese
u_v	[%]	Akční veličina modelovaného regulátoru malé smyčky
x	[m]	Vzdálenost od počátku souprůdného přehříváku (topené plochy)
u_1	[m/s]	Střední rychlost páry ve směru x
u_2	[m/s]	Střední rychlost spalín ve směru x
α_{W1}	[W/m ² /K]	Koeficient přestupu tepla konvekcí mezi stěnou a parou
α_{W2}	[W/m ² /K]	Koeficient přestupu tepla konvekcí mezi stěnou a spalínami

$\delta_T(t)$	[—]	Relativní chyba mezi měřeným a simulovaným průběhem signálu $T(t)$
$\overline{\delta_T}$	[—]	Střední hodnota relativní chyby δ_T
τ	[s]	Posunutí v čase
τ_1	[s]	Časová konstanta prohřívání páry
τ_2	[s]	Časová konstanta prohřívání spalin
τ_{W1}	[s]	Časová konstanta prohřívání materiálu přehříváku ze strany páry
τ_{W2}	[s]	Časová konstanta prohřívání materiálu přehříváku ze strany spalin
DAE		Diferenciální algebraická rovnice
EDĚ		Elektrárna Dětmarovice
G6/261B		Funkční generátor, obsažený v regulátoru malé smyčky
ODE		Obyčejná diferenciální rovnice
PDE		Parciální diferenciální rovnice
SISO		Single Input – Single Output

Index $_{\text{sim}}$ u signálů obecně znamená signál spočtený simulací. Signály teplot, hmotnostních průtoků a procent otevření ventilu bez označení indexu $_{\text{sim}}$ se považují za signály získané měřením.

Obsah

1	Úvod	1
2	Současný stav a cíle dizertační práce	2
3	Výstupní přehřívák páry	3
3.1	Souproudý přehřívák páry	3
3.2	Netopená plocha	5
3.3	Implementace výstupního přehříváku páry v Simulinku	6
4	Regulační obvod výstupního přehříváku páry	9
4.1	Malá smyčka	9
4.2	Vstřík pára-voda	10
5	Testování regulačního obvodu přehříváku páry s reálnými daty	12
5.1	Testování regulačního obvodu malé smyčky	13
5.2	Testování matematického modelu přehříváku páry	15
5.3	Testování regulačního obvodu přehříváku páry	19
6	Diskuze výsledků	26
7	Závěr	34
	Literatura	37
	Curriculum vitae	38
	Publikace autora	39

1 Úvod

Předložená dizertační práce se zabývá modelováním regulačního obvodu výstupního přehříváku páry na kotli černouhelné elektrárny v Dětmarovicích. Model regulačního obvodu obsahuje vybrané technologické části kotle, kde některé z nich jsou popsány jako soustavy s distribuovanými parametry.

Matematický model přehříváku páry popisují parciální diferenciální rovnice výměny tepla mezi dvěma médii skrz materiál přehříváku. V poslední dekádě bylo zveřejněno několik publikací, zabývajících se odvozením matematického modelu pro tepelné výměníky [15, 16]. Uvedené matematické modely zahrnují kromě výměny tepla mezi médii i projevy tlaku a rychlosti proudícího média výměníkem na stěnu přehříváku a médium samotné. Výpočet těchto publikovaných modelů je řešen za pomoci softwaru FLUENT.

Matematické modely výměny tepla v této práci neuvažují projevy tlaku a rychlosti dopravovaného média, v dalším textu jsou nazývány jako zjednodušené teplotní modely výměny tepla. Jednotlivé části matematického modelu výměny tepla popisovaného v této práci jsou implementovány jako bloky S-funkce v Simulinku. Tyto bloky mají své vstupy, vnitřní stavy a výstupy. Řešení matematického modelu obsaženého v S-funkci obstarává standardní řešič z množiny řešičů nabízených Simulinkem. Odpadá tak nutnost implementovat složité numerické metody pro řešení matematického modelu [2, 9, 12] s distribuovanými parametry. Zapouzdření přehříváku páry do formy bloku S-funkce umožňuje takto vytvořené matematické modely jednoduše spojovat a parametrizovat. Nedílnou komponentou regulačního obvodu přehříváku páry je matematický model vstřiku voda-pára, který je součástí akčního členu malé regulační smyčky. Matematický model vstřiku je rovněž implementován do bloku S-funkce.

V dizertační práci je popisována metodika výpočtu časového průběhu signálu působícího na matematický model přehříváku. Tento signál je souhrnně nazván jako signál virtuální teploty spalín, jelikož v sobě zahrnuje i další vlivy těžko měřitelných nebo neměřených signálů působících na přehřívák. Je provedeno experimentální ověření, že s měnicími se parametry přehříváku na straně spalín se mění i střední hodnota virtuální teploty spalín, a takto pružný matematický model lze nasadit do modelu regulačního obvodu výstupního přehříváku páry, aniž by se výrazně ovlivnila kvalita regulace. Bylo publikováno několik prací [11, 13, 14], které dokazují, že koeficient přestupu tepla konvekcí na straně spalín α_{W2} je velice citlivý parametr, jehož přesná hodnota je obtížně stanovitelná. Velikost tohoto koeficientu je ovlivňována geometrií a uspořádáním potrubí, rychlostí proudění spalín a v neposlední řadě znečištěním výměníku sazemi. Tyto skutečnosti byly po konzultaci s odborníkem prohlášeny za základní příčinu proměnlivých hodnot vybraných parametrů přehříváku na straně spalín.

Pro sestavení regulačního obvodu výstupního přehříváku páry je využito projektové dokumentace. Podrobnosti byly konzultovány s pracovníky elektrárny a od-

borníkem zabývajícím se regulací elektrárenských kotlů.

Dizertabilním jádrem této práce je:

- návrh metodiky pro modelování a analýzu statických a dynamických vlastností výstupního přehříváku páry a jednotlivých komponent regulačního obvodu (model vysokotlakého přehříváku páry a model vstříku voda-pára včetně všech regulátorů teploty páry)
- vyhodnocení shody matematického modelu výstupního přehříváku páry a jednotlivých komponent regulačního obvodu s reálnými daty z provozu 200 MW elektrárenského bloku Elektrárny Dětmarovice.

Původním přínosem práce je:

- odvození parciálních diferenciálních rovnic popisujících výměnu tepla mezi dvěma médii skrz stěnu výměníku,
- aplikace metod statistické dynamiky pro analýzu stochastických signálů působících na soustavu s distribuovanými parametry,
- verifikace modelu regulačního obvodu obsahujícího modely soustav s distribuovanými parametry na reálných datech z provozu skutečného regulačního obvodu.

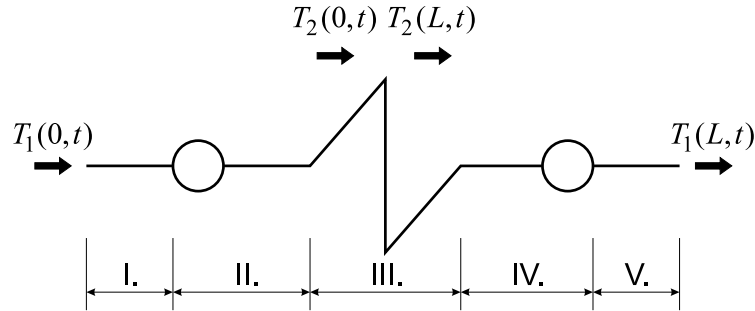
Motivací k této práci je problematika regulace distribuovaných soustav, představujících výměníky tepla, jež je momentálně řešena v rámci grantu GA ČR 102/09/1003 „Modelování vysokoteplotních výměníků tepla a využití modelů pro optimální regulaci výměníků.“ Tato práce rovněž vznikla za podpory interního grantu IGA BI 4559951 „Aplikace metod statistické dynamiky lineárních systémů.“

2 Současný stav a cíle dizertační práce

Potřeba znát statické a dynamické vlastnosti přehříváku páry je nezbytnou součástí procesu vývoje kotle. Současná praxe je taková, že firmy zabývající se projekcí kotlů (Vítkovice Power Engineering, a.s., IVITAS, a.s.) spoléhají při návrhu kotlů na parametry přehříváků páry uváděné výrobcem. Bylo publikováno několik prací na téma matematického modelování statických a dynamických vlastností přehříváku páry, viz vybrané práce [15, 16]. Dosud však nebyl proveden komplexní rozbor chování těchto matematických modelů na dostatečném množství provozních dat z provozu skutečného přehříváku páry. Tato práce má za cíl ukázat, že matematické modely těchto přehříváků páry lze použít pro účely simulací regulačních procedur skutečného přehříváku, jenž je popsán zjednodušeným matematickým modelem výměny tepla. Konstruktor kotle tak získá přehled o chování přehříváku nejen jako SISO soustavy, ale i jako soustavy, která umožňuje zobrazení rozložení teplot po délce přehříváku, které jsou na skutečném přehříváku neměřitelné.

3 Výstupní přehřívák páry

Matematický model výstupního přehříváku páry lze namodelovat jako sériové spojení dvou typů soustav. Tento model v sobě zahrnuje spojení netopené plochy a souproutého přehříváku páry, jak ilustruje obrázek 1.



Obrázek 1: Spojení netopených ploch a souproutého přehříváku páry.

Římské číslice I., II., IV. a V. označují netopené plochy. Součástí II. a IV. netopené plochy je rozdělovací (sběrná) komora, kde se rozdělují (spojují) jednotlivé trubky, jež tvoří souproutý přehřívák páry. Souproutý přehřívák páry, označený III., je vystaven působení spalin. Zde se pára přehřívá na požadovanou pracovní teplotu turbíny.

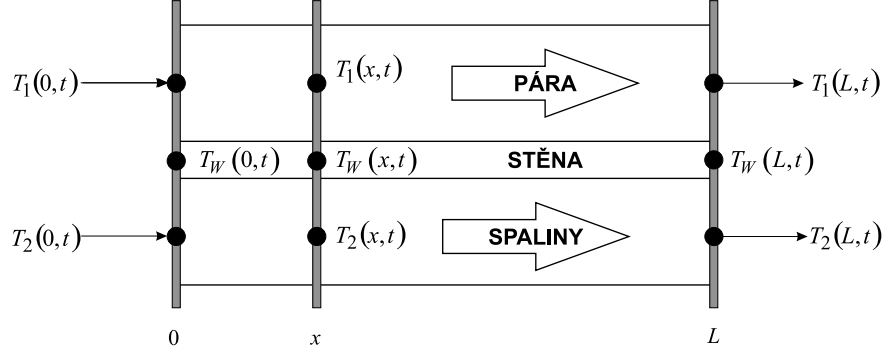
3.1 Souproutý přehřívák páry

Konvekční ohřívák páry bývá konstruován jako trubka v trubce nebo jako plášťový s trubkovým výměníkem uvnitř [4]. Přehřívák páry je průtočný výměník tepla, kde jedním médiem je kotlem vyráběná pára, druhým jsou horké spaliny. Konstrukčně bývá řešen jako souproutý, protiproudý nebo jako kombinace obou těchto základních typů [3]. Třetí stupeň výstupního přehříváku páry bloku kotle, jehož dynamika je v této práci zkoumána, je koncipován jako souproutý přehřívák páry. Tato kapitola se zabývá matematickými modely výměny tepla mezi dvěma médii skrz stěnu výměníku, respektive mezi jedním médiem a stěnou výměníku.

Matematický model přehříváku páry je definován třemi stavovými proměnnými. Tyto stavové proměnné jsou následující:

- $T_1(x, t)$ Teplota páry
- $T_2(x, t)$ Teplota spalin
- $T_W(x, t)$ Teplota stěny

Stavové proměnné jsou funkcí jak času t , tak vzdálenosti x . Tato vzdálenost určuje aktuální pozici řezu v přehřívačce. Tento zjednodušený matematický model přehřívačce páry popisuje výměnu tepla mezi médiem, proudícím potrubím a stěnou přehřívačce. Dále popisuje výměnu tepla mezi stěnou přehřívačce a spaliny obtékajícími přehřívačkou. Jedná se tedy o teplotní model, který nezahrnuje projevy tlaku a rychlosti proudění média (páry) na proudící médium a materiál přehřívačce. Projevy tlaku na materiál potrubí se zabývaly práce [2, 8, 9]. Obrázek 2 ukazuje hlavní schéma matematického modelu souproutého přehřívačce páry.



Obrázek 2: Znázornění stavových veličin v souproutém výměníku tepla.

Za předpokladu, že konstrukční parametry přehřívačce jsou konstantní, lze souproutý přehřívačce páry popsat následující soustavou parciálních diferenciálních rovnic prvního řádu [3].

- Pro teplotu páry:

$$T_W(x, t) - T_1(x, t) = \tau_1 \left[u_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} \right] \quad (1)$$

- Pro teplotu spalín:

$$T_W(x, t) - T_2(x, t) = \tau_2 \left[u_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

- Pro teplotu stěny:

$$\frac{T_1(x, t) - T_W(x, t)}{\tau_{W1}} + \frac{T_2(x, t) - T_W(x, t)}{\tau_{W2}} = \frac{\partial T_W(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

kde

$$\tau_1 = \frac{c_1 M_1}{\alpha_{W1} O_1 |u_1|} \quad \text{a} \quad \tau_{W1} = \frac{c_W G}{\alpha_{W1} O_1} \quad (4)$$

a dále

$$\tau_2 = \frac{c_2 M_2}{\alpha_{W2} O_2 |u_2|} \quad \text{a} \quad \tau_{W2} = \frac{c_W G}{\alpha_{W2} O_2} \quad (5)$$

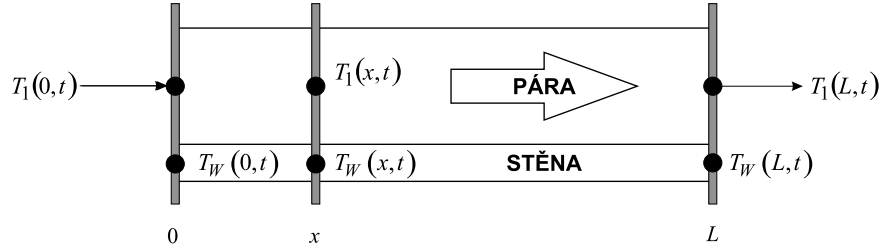
3.2 Netopená plocha

Souproudý přehřívák páry je v regulačním obvodu připojen přes vysokotlaké potrubí, kde se zanedbává vliv okolní teploty na toto potrubí. Matematický model tohoto potrubí popisuje výměnu tepla mezi médiem proudícím potrubím a stěnou potrubí. Pro zjednodušení názvosloví bude tento matematický model označen jako netopená plocha.

Matematický model netopené plochy je definován dvěma stavovými proměnnými. Tyto stavové proměnné jsou následující:

- $T_1(x, t)$ Teplota páry
- $T_W(x, t)$ Teplota stěny

Obrázek 3 ukazuje hlavní schéma matematického modelu netopené plochy.



Obrázek 3: Znázornění stavových veličin v matematickém modelu netopené plochy.

Za předpokladu, že konstrukční parametry netopené plochy jsou konstantní, lze tuto netopenou plochu popsat následující soustavou parciálních diferenciálních rovnic prvního řádu [3].

- Pro teplotu páry:

$$T_W(x, t) - T_1(x, t) = \tau_1 \left[u_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} \right] \quad (6)$$

- Pro teplotu stěny:

$$\frac{T_1(x, t) - T_W(x, t)}{\tau_{W1}} = \frac{\partial T_W(x, t)}{\partial t} \quad (7)$$

3.3 Implementace výstupního přehříváku páry v Simulinku

V této podkapitole bude demonstrován zjednodušený výklad implementace PDE popisujících výměnu tepla mezi dvěma médii. Postup bude ukázán na matematickém modelu souproutého přehříváku páry. Na závěr bude ukázáno rozložení teplot na netopené ploše označené II. Za účelem implementace tohoto matematického modelu do bloku systémové funkce (S-funkce) v Simulinku je potřeba definovat vektor stavů, který bude zahrnovat jednotlivé stavy fyzikálních veličin v modelu, první derivace těchto stavových veličin a vektor výstupních veličin.

- Vektor výstupních veličin
 $T1_out \equiv x[N - 1] \equiv T_1(L, t)$
 $T2_out \equiv x[2N - 1] \equiv T_2(L, t)$
 $TW_out \equiv x[3N - 1] \equiv T_W(L, t)$
- Vektor stavových veličin
 $T_1(0, t) \div T_1(N - 1, t) \equiv x[0] \div x[N - 1]$
 $T_2(0, t) \div T_2(2N - 1, t) \equiv x[N] \div x[2N - 1]$
 $T_W(0, t) \div T_W(3N - 1, t) \equiv x[2N] \div x[3N - 1]$
- Vektor derivací stavových veličin
 $\frac{dT_1(0,t)}{dt} \div \frac{dT_1(L,t)}{dt} \equiv dx[0] \div dx[N - 1]$
 $\frac{dT_2(0,t)}{dt} \div \frac{dT_2(L,t)}{dt} \equiv dx[N] \div dx[2N - 1]$
 $\frac{dT_W(0,t)}{dt} \div \frac{dT_W(L,t)}{dt} \equiv dx[2N] \div dx[3N - 1]$

Aplikováním metody konečných diferencí na matematický model souproutého přehříváku vznikne síť uzlů, kde každý uzel představuje stavovou veličinu modelu, viz obrázek 4. Úpravou rovnic (1) ÷ (3) se osamostatní derivace stavových veličin dle času (8) ÷ (10).

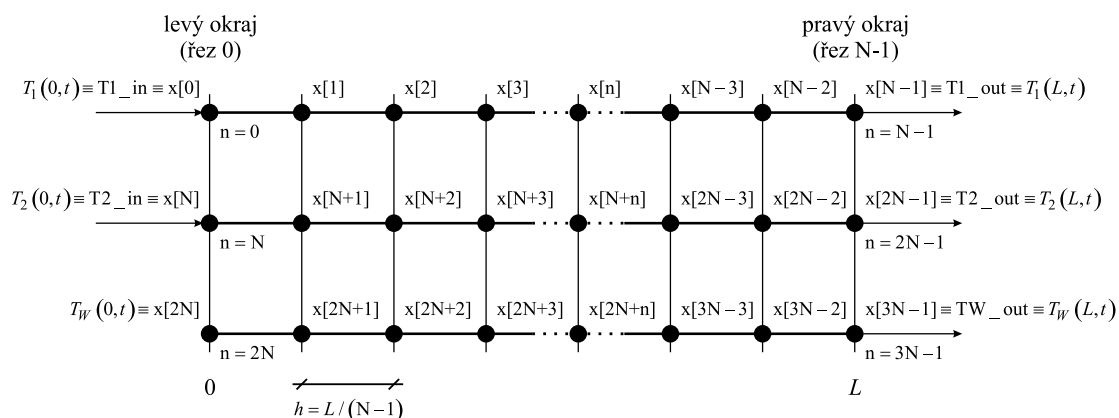
$$\frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_1} (T_W(x, t) - T_1(x, t)) - u_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_2} (T_W(x, t) - T_2(x, t)) - u_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_W(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_{W1}} (T_1(x, t) - T_W(x, t)) + \frac{1}{\tau_{W2}} (T_2(x, t) - T_W(x, t)) \quad (10)$$

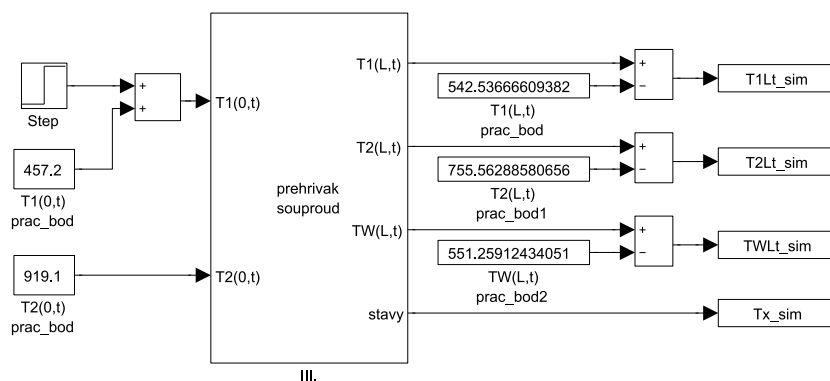
Derivace ve směru x se nahradí numerickými derivacemi. Tyto derivace stavových veličin se zapíší do rutiny *mdlDerivatives* v S-funkci. Vzhledem k odlišnostem ve výpočtu numerických derivací pro okraje přehříváku je výpočet derivací rozdělen do tří úseků: pro levý okraj, prostřední řezy a pravý okraj.

Obrázek 5 ukazuje implementovaný matematický model souproutého přehříváku páry do bloku S-funkce. Zdrojový soubor v podobě S-funkce je zkompileován do *mexw32* (resp. *mexw64* pro 64bitové systémy) souboru. Blok S-funkce je maskován do podoby bloku se vstupy, svými stavy, parametry a výstupy bloku. S-funkce pro



Obrázek 4: Diskretizace stavových veličin souproutého přehříváku páry.

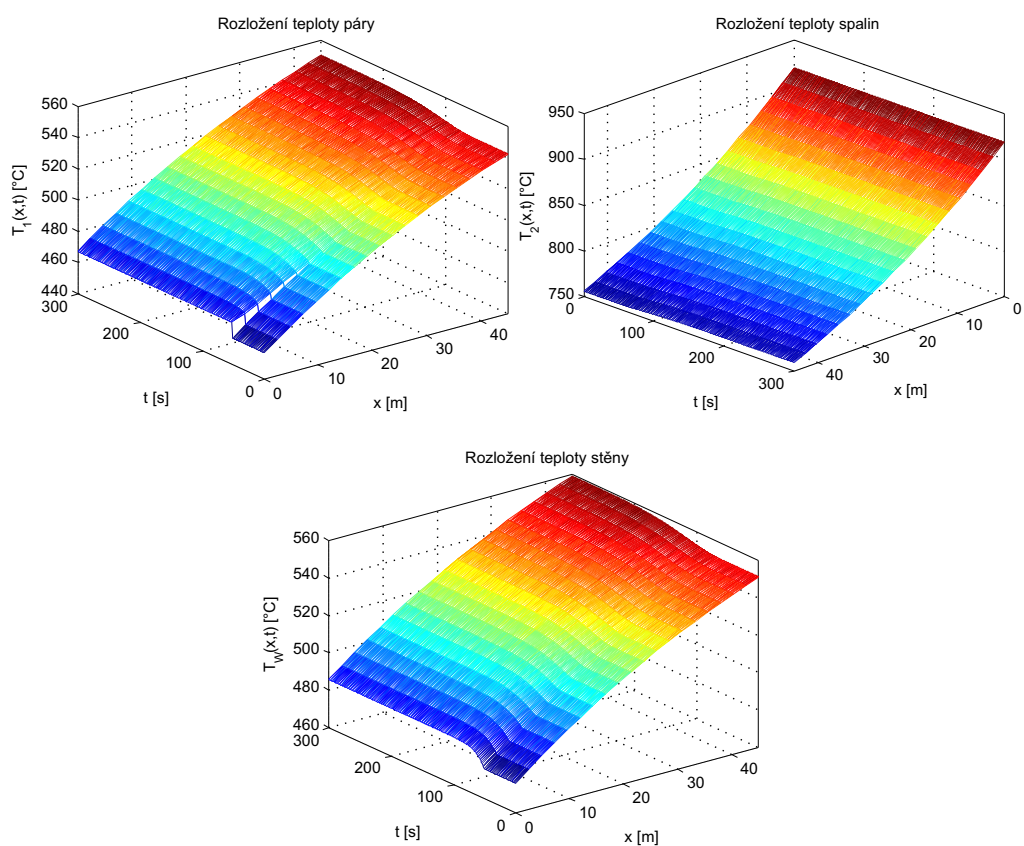
matematický model souproutého přehříváku páry obsahuje 16 parametrů. Tyto parametry slouží pro výpočet časových konstant přehříváku dle rovnic (4) a (5). Dalšími parametry jsou délka přehříváku L , počet řezů N (viz obr. 4) a dále parametr pro nastavení okrajových podmínek přehříváku. Tyto okrajové podmínky určují rozložení teplot páry, spalín a stěny po délce přehříváku v čase $t = 0$.



Obrázek 5: Model souproutého přehříváku páry implementovaného v Simulinku.

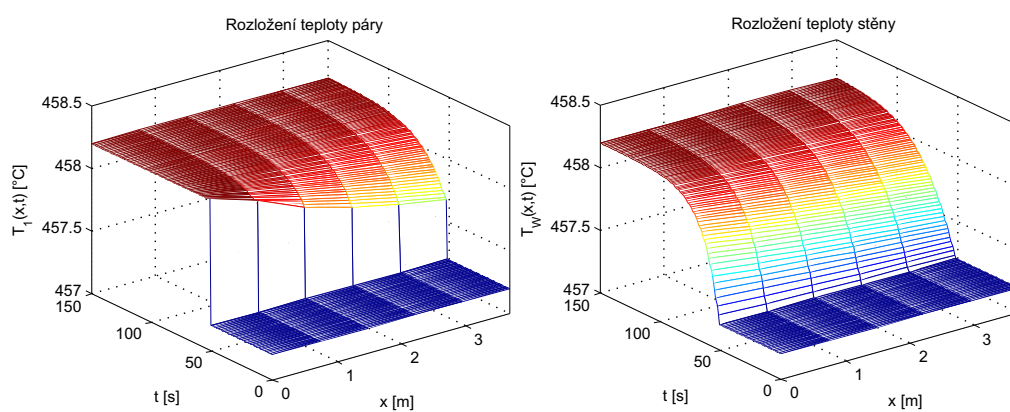
Obrázek 6 ukazuje rozložení teplot na přehříváku po délce x i v čase t . Pro ilustraci byla na vstup $T_1(0,t)$ přehříváku přivedena skoková změna teploty páry z $457,2$ °C na teplotu $458,2$ °C. Tato změna na vstupní teplotě nastala v čase $t = 50$ s.

Obrázek 7 ukazuje rozložení teplot na netopené ploše po délce x i v čase t . Na vstup $T_1(0,t)$ netopené plochy byl přiveden v čase $t = 50$ s jednotkový skok. Navržený matematický model netopené plochy neuvažuje přestup tepla ze stěny potrubí do okolí. Takto uvažovaný model se projeví tím, že nenastává pokles teploty páry



Obrázek 6: Rozložení teplot na souproudém přehříváku páry.

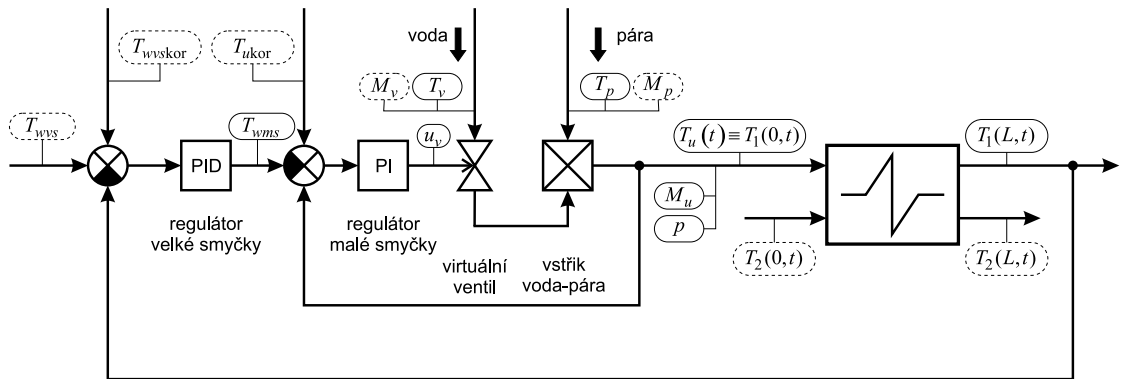
po délce potrubí a teplota stěny T_W se po době, dané časovými konstantami netopené plochy, ustálí na teplotě T_1 .



Obrázek 7: Rozložení teplot na netopené ploše II.

4 Regulační obvod výstupního přehříváku páry

Celkové zjednodušené schéma regulačního obvodu výstupního přehříváku páry je uvedeno na obrázku 8. Jeho základním úkolem je udržovat konstantní teplotu páry $T_1(L, t) = 540\text{ °C}$ na výstupu přehříváku. Podkladem pro tvorbu modelu regulačního obvodu byla poskytnutá dokumentace k regulaci výstupního přehříváku páry kotle 2. bloku elektrárny Dětmarovice. V dizertační práci je modelován regulační obvod výstupního přehříváku páry kotle 4. bloku elektrárny. Nastavení regulátorů pro 4. blok elektrárny bylo konzultováno s pracovníky obsluhy tohoto bloku.



Obrázek 8: Regulační obvod přehříváku páry.

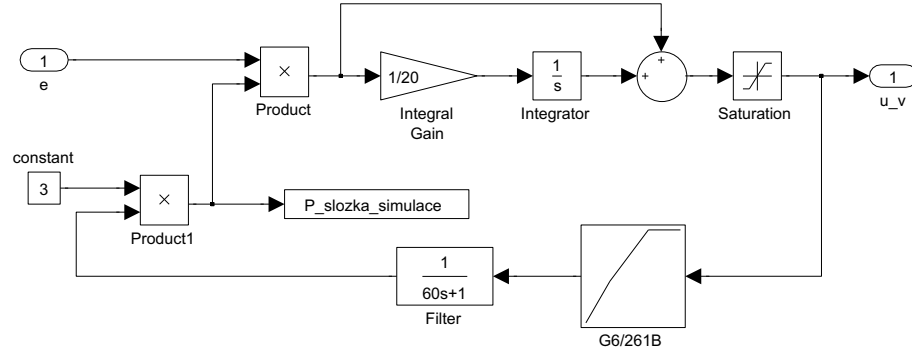
Regulační obvod přehříváku obsahuje dvě regulační smyčky. Velká regulační smyčka má za úkol udržovat konstantní teplotu páry $T_1(L, t)$ na výstupu přehříváku. Regulátor této smyčky je nelineární PID regulátor s filtrací derivační složky. Parametry tohoto regulátoru se mění v závislosti na průtočném množství páry turbogenerátorem. Tyto parametry jsou zadávány prostřednictvím funkčních generátorů. V oblasti provozního režimu elektrárny, kdy je hmotnostní průtok páry turbogenerátorem vyšší než 450 t/h, jsou parametry tohoto PID regulátoru konstantní. Vzhledem k tomu, že je zkoumán regulační obvod výstupního přehříváku páry kotle 4. bloku elektrárny pracující na konstantní výkonové hladině 180 MW, je regulátor velké smyčky nahrazen lineárním PID regulátorem.

4.1 Malá smyčka

Druhou regulační smyčkou v regulačním obvodu přehříváku páry je malá regulační smyčka. Úkolem této smyčky je udržovat konstantní teplotu páry na vstupu přehříváku a zabránit tomu, aby se pára protékající přehřívákem nedostala do oblasti mokré páry. Působí proti vlivům dalších provozních veličin na regulační obvod vstupujících do akčního členu malé smyčky - vstříku. Malá smyčka se skládá z nelineárního PI regulátoru smyčky, dvou ventilů a vstříku. Teplota páry na vstupu

přehříváku $T_1(0)$ je regulována pomocí vstřiku voda-pára (viz podkapitola 4.2). Do vstřiku vstupuje demineralizovaná voda, jejíž průtok je ovlivňován prostřednictvím dvou paralelně zapojených regulačních ventilů. Popis zapojení regulačních ventilů je detailněji popsán v dizertační práci.

Regulátor malé smyčky je typu PI. Zápis řídicího algoritmu je v multiplikativním tvaru stejně jako u regulátoru velké smyčky. Proporcionální složka u regulátoru malé smyčky je dána funkčním generátorem **G6/261B**, viz obr. 9. Tento funkční generátor na základě otevření regulačního ventilu (signál u_v) nastavuje proporcionální složku regulátoru. Výsledek je zároveň filtrován soustavou prvního řádu s časovou konstantou 60 s. Akční veličina regulátoru je omezena saturací na interval 0 až 100. Konstanta o hodnotě 3, kterou je násoben výstup z filtru je ve skutečnosti výstupem dalšího funkčního generátoru. I zde platí obdobná situace jako u regulátoru velké smyčky, že pro ustálený provozní režim bloku elektrárny, kdy průtok páry turbogenerátorem je větší než 450 t/h, je výstup z funkčního generátoru konstantní a jeho hodnota je 3.



Obrázek 9: PI regulátor malé smyčky.

4.2 Vstřik pára-voda

Pro regulaci teploty páry na vstupu přehříváku je v regulačním obvodu využito vstřikování vody do páry. Tento vstřik představuje ve spojení s ventilem akční člen regulátoru malé smyčky. Matematický model vstřiku pára-voda popisuje výpočet výstupní teploty ochlazené páry a jejího výstupního množství. Pro výpočet výstupní teploty ochlazené páry je potřeba znát entalpie jednotlivých složek a jejich hmotnostní průtoky. Rovnice (11) představuje tepelnou bilanci, jež je využita pro výpočet výstupní teploty ochlazené páry.

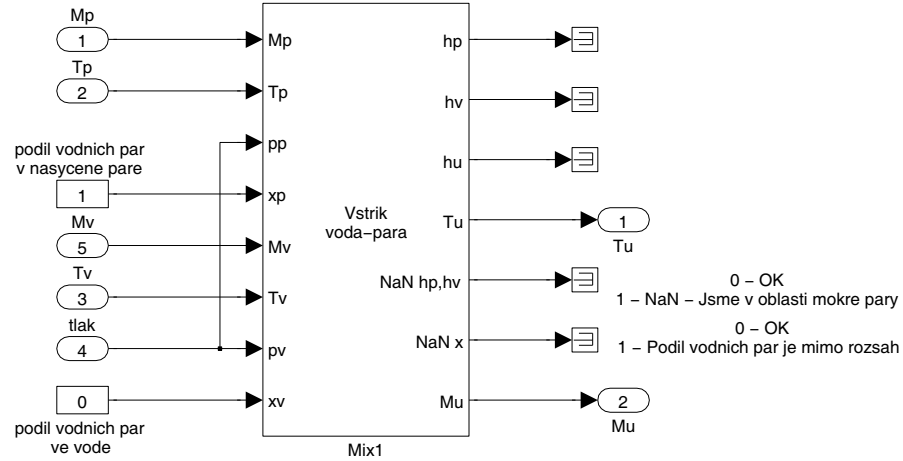
$$M_u \cdot h_u = M_v \cdot h_v + M_p \cdot h_p \quad (11)$$

Kde $h_v = f(p, T_v)$ a $h_p = f(p, T_p)$.

Matematický model předpokládá, že obě média vstupující do vstříku mají stejný tlak p . Pro určení entalpií jsou použity tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry dle průmyslové formulace IAPWS IF-97 [6].

Výsledná teplota směsi T_u se určí z výše zmíněných tabulek. Výsledné množství směsi je součtem hmotnostního průtoku vody a páry, vstupujících do vstříku (12).

$$M_u = M_v + M_p \quad (12)$$



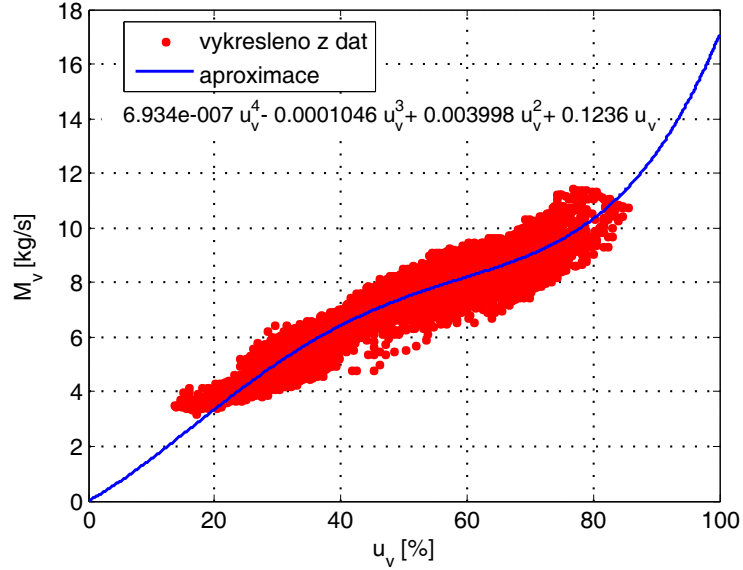
Obrázek 10: Model vstříku v Simulinku.

Vstřík je implementován jako S-funkce v Simulinku (viz obr. 10). S-funkce obsahuje funkce z knihovny *Xsteam* [6], potřebné pro výpočet entalpií jednotlivých složek a pro výsledné určení teploty směsi. Toto zapojení umožňuje počítat výslednou teplotu směsi pára-voda pro široký rozsah teplot a tlaků. Tabulky zahrnují rovněž fázové přeměny, kdy pára může začít kondenzovat. Pro tento případ bylo pro tvorbu vstříku využito volání entalpií i na základě teploty a podílu vodních par v jednotlivých složkách.

Z měřených dat z reálného provozu (viz kapitola 5) jsou pro matematický model vstříku známy následující provozní signály:

- teplota páry vstupující do vstříku – T_p [°C]
- teplota vody protékající ventilem II – T_{vII} [°C]
- teplota vody protékající ventilem IIa – T_{vIIa} [°C]
- výsledná teplota směsi – T_u [°C]
- množství směsi – M_u [kg/s]
- tlak směsi – p [MPa]

Teploty vody T_{vII} a T_{vIIa} jsou měřeny zvlášť u obou ventilů. Rozdíly mezi těmito teplotami jsou minimální, a proto byly tyto teploty nahrazeny jejich aritmetickým průměrem označeným T_v . V přehledu měřených signálů chybí informace o hmotnostních průtocích páry M_p a vody M_v . V dizertační práci je popisován algoritmus, pomocí kterého lze vypočítat na základě matematického modelu vstřiku (11) a (12), znalosti teplot T_p , T_v , T_u a hmotnostního průtoku směsi za vstřikem M_u chybějící signály hmotnostních průtoků páry M_p a vody M_v .

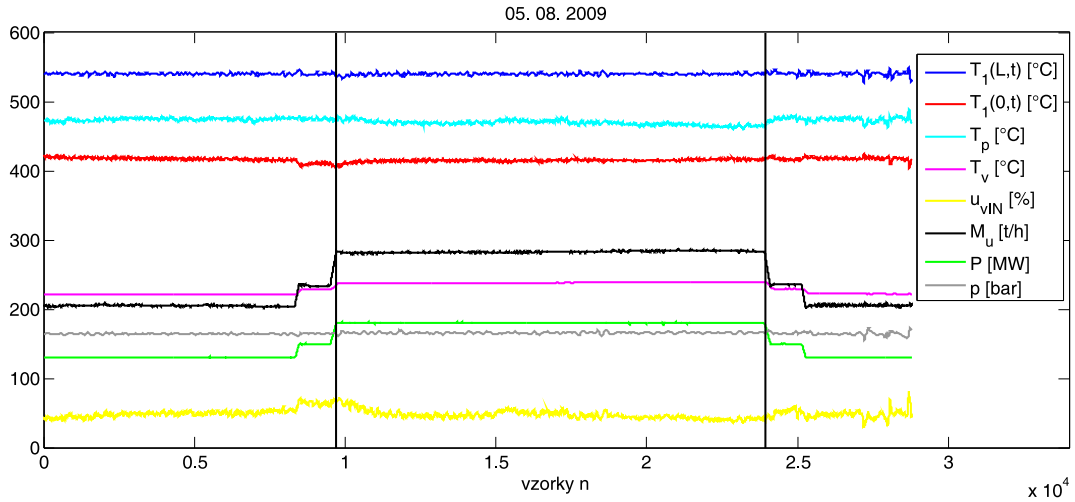


Obrázek 11: Odhadnutá statická charakteristika ventilu.

Spočtený průběh hmotnostního průtoku vody $M_v(t)$ a průběh otevření ventilu $u_v(t)$ jsou využity pro odhadnutí statické charakteristiky ventilu. Tuto statickou charakteristiku ukazuje obrázek 11. Statická charakteristika ventilu popisuje závislost hmotnostního průtoku vody M_v na procentu otevření jednoho virtuálního ventilu, který nahrazuje paralelně zapojené ventily. Tato statická charakteristika byla aproximována polynomem čtvrtého stupně. Ventil v regulačním obvodu pracuje v rozmezí daném červeným shlukem bodů na obrázku 11.

5 Testování regulačního obvodu přehříváku páry s reálnými daty

Pro ověření matematického modelu výstupního přehříváku páry a jeho regulačního obvodu byla získána data z reálného provozu tohoto regulačního obvodu výstupního přehříváku. Elektrárenský blok pracuje standardně v několika výkonových režimech, které jsou závislé na požadavcích distributora elektrické energie.



Obrázek 12: Celodenní záznam provozních signálů s vymezením ustáleného provozního režimu.

Pro experiment bylo získáno dvacet celodenních záznamů dat, kdy elektrárenský blok pracoval v několika provozních režimech (včetně najíždění a odstavování bloku elektrárny). Pro ověření regulačního obvodu bylo vybráno deset celodenních záznamů z přelomu července a srpna roku 2009 obsahujících potřebné provozní signály. Seznam těchto měřených provozních signálů je uveden v dizertační práci. Z těchto záznamů byla vyseparována data, kdy elektrárenský blok pracoval na výkonu 180 MW. Jeden celodenní záznam s vymezeným úsekem konstantního výkonu je ukázán na obrázku 12. Perioda vzorkování měřených dat t_s je 3 sekundy. Vertikální linky v obrázku 12 vymezují ustálený provozní režim elektrárny, kdy elektrárna pracovala na výkonu 180 MW. Druhá sada měření z počátku října roku 2009 obsahovala málo vzorků dat, kdy elektrárna pracovala v ustáleném režimu.

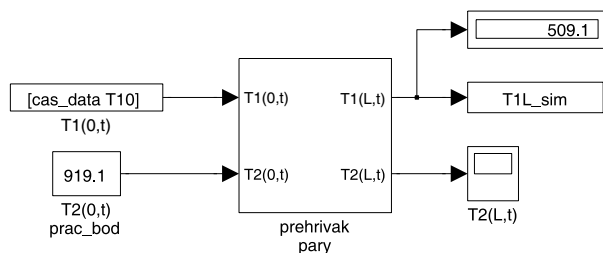
5.1 Testování regulačního obvodu malé smyčky

V dizertační práci byl nejprve zkoumán vliv provozních signálů na samostatný regulační obvod malé smyčky. Na regulační obvod malé smyčky byly přivedeny provozní signály $M_u(t)$, $T_p(t)$, $T_v(t)$, $p(t)$ a signál $T_{wms}(t)$, představující žádanou hodnotu teploty na vstupu přehříváku $T_1(0, t)$ (viz obr. 8). Vzhledem k rozsáhlosti podkapitoly v dizertační práci je zde uvedeno celkové schéma malé regulační smyčky, viz obr. 13. Toto schéma obsahuje signál korekce žádané hodnoty teploty za 2. vstřikem $T_{ukor}(t)$. Výpočet hmotnostního průtoku vody M_v je prováděn prostřednictvím časově proměnného zesílení ventilu $K_v(t)$. Signál $T_1(0, t)$ je v této podkapitole označen jako $T_u(t)$.

Obrázek 14 ukazuje průběh relativní chyby mezi měřenou teplotou T_u a teplotou simulovanou regulačním obvodem malé smyčky T_{usim} s přidanou korekcí T_{ukor} .

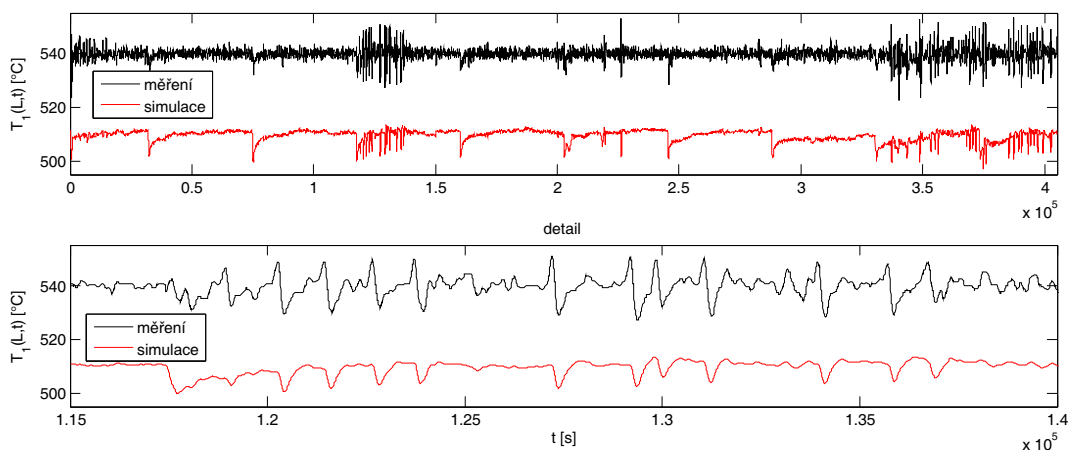
5.2 Testování matematického modelu přehříváku páry

Dalším důležitým bodem v dizertační práci bylo zkoumání vlivu provozních signálů na samotný model výstupního přehříváku páry, jenž je vyčleněn z regulačního obvodu. Na přehřívák páry byl v Simulinku přiveden signál teploty páry na vstupu přehříváku $T_1(0, t)$ spolu s konstantní teplotou spalín $T_2(0)$ (viz obr. 15).



Obrázek 15: Přehřívák páry buzený signály měřené teploty $T_1(0, t)$ a konstantní teploty $T_2(0, t)$.

Parametry přehříváku byly přesně nastaveny dle technologického zadání, které je uvedeno v příloze dizertační práce. Jak je patrné z výsledku této simulace (viz obr. 16), je průběh teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$, vypočtený matematickým modelem, značně odlišný od měřeného průběhu. Signál teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$ do určité míry kopíruje trend teploty páry na vstupu přehříváku $T_1(0, t)$.



Obrázek 16: Porovnání signálů teplot $T_1(L, t)$ pro model přehříváku s nekorigovanými parametry a konstantní teplotou $T_2(0)$.

Výpočtem středních hodnot provozních signálů byly zjištěny následující nesrovnalosti mezi technologickým zadáním a měřeními daty:

- Hmotnostní průtok páry za vstřikem M_u je dle zadání technologických parametrů modelu 75 kg/s, ale střední hodnota tohoto průtoku vypočtená z dat vyšla $\overline{M_u} = 78,9048$ kg/s.
- Teplota páry $T_1(0)$ na vstupu přehříváku je dle zadání technologických parametrů modelu 457,2 °C, ale střední hodnota této teploty vypočtená z dat vyšla $\overline{T_{1(0)}} = 416,6777$ °C.

Rozdíl středních hodnot teplot páry na výstupu přehříváku u měřeného signálu $T_1(L, t)$ a u simulovaného signálu $T_{1sim}(L, t)$ dosahuje hodnoty 30,2 °C. Tyto rozdíly jak v časových průbězích teplot páry $T_1(L, t)$, tak v jejich středních hodnotách, jsou způsobeny neznalostí časového průběhu teploty spalin na vstupu přehříváku $T_2(0, t)$. Signál teploty spalin se v místě, kde se nachází výstupní přehřívák páry, na skutečném kotli neměří. Je známa pouze přibližná technologická hodnota teploty spalin v místě, kde se nachází přehřívák. Tato teplota je uvedena v technologickém zadání a také v nákresu kotle v příloze dizertační práce.

Signál teploty spalin na vstupu přehříváku $T_2(0, t)$ lze vypočítat na základě znalosti signálu teploty páry na vstupu přehříváku $T_1(0, t)$, signálu teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$ a matematického modelu přehříváku. Takto vypočtený signál teploty spalin bude pojmenován jako signál **virtuální teploty spalin na vstupu přehříváku** $T_{2v}(0, t)$. Tento signál v sobě zahrnuje všechny, na skutečném kotli, obtížně měřitelné či neměřitelné signály, jež působí spolu se signálem teploty spalin na výstupní přehřívák páry. Signál virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$ v sobě zahrnuje fluktuace hmotnostního průtoku spalin M_2 , rychlosti spalin u_2 a samotné teploty spalin $T_2(0, t)$ na výstupní teplotu páry přehříváku $T_1(L, t)$. Princip výpočtu signálu virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$ je ukázán na obrázku 17. S výpočtem signálu virtuální teploty spalin na vstupu přehříváku úzce souvisí výpočet ustáleného rozložení teplot v přehříváku.

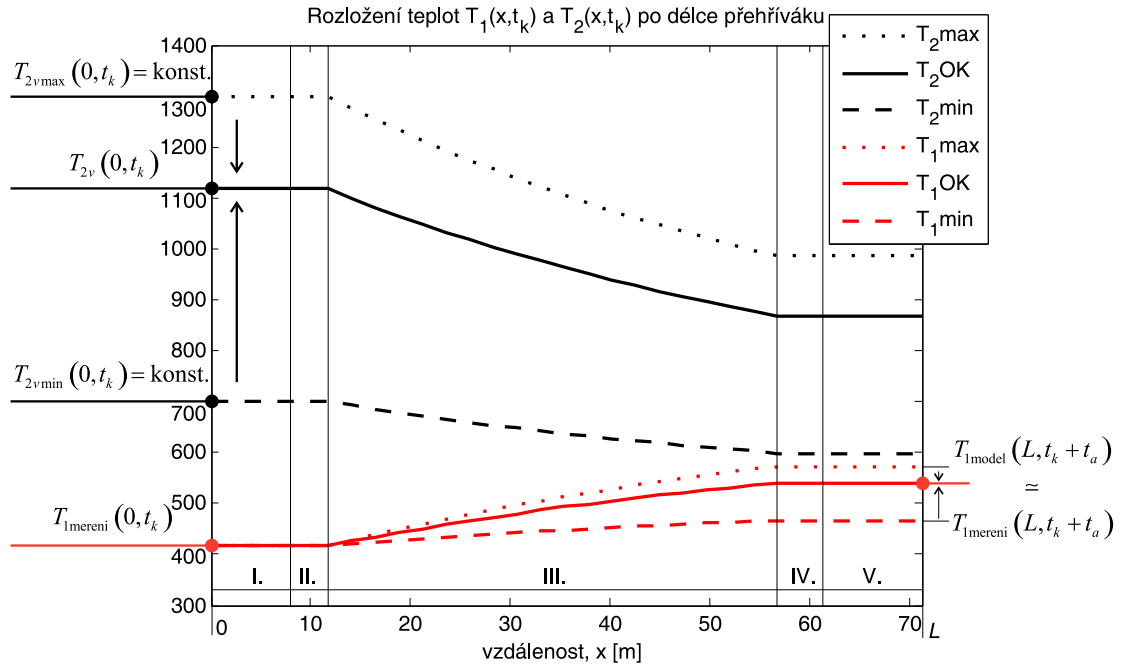
Pro výpočet ustáleného rozložení teplot po délce přehříváku je třeba upravit parciální diferenciální rovnice (1), (2), (3), (6) a (7). V těchto rovnicích byly všechny derivace teplot podle času položeny rovny nule. Pro matematický model souproutého přehříváku se takto upravené rovnice (13), (14) a (15) stanou soustavou diferenciálních a algebraické rovnice (DAE soustava rovnic).

- Pro rozložení teploty páry po délce (souproutý přehřívák páry):

$$\frac{\partial T_1(x, t_\infty)}{\partial x} = \frac{1}{\tau_1 u_1} \cdot (T_W(x, t_\infty) - T_1(x, t_\infty)) \quad (13)$$

- Pro rozložení teploty spalin po délce (souproutý přehřívák páry):

$$\frac{\partial T_2(x, t_\infty)}{\partial x} = \frac{1}{\tau_2 u_2} \cdot (T_W(x, t_\infty) - T_2(x, t_\infty)) \quad (14)$$



Obrázek 17: Principiální schéma výpočtu signálu virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$.

- Pro rozložení teploty stěny po délce (souproudý přehřívák páry):

$$T_W(x, t_\infty) = \frac{\tau_{W2}}{\tau_{W1} + \tau_{W2}} \cdot T_1(x, t_\infty) + \frac{\tau_{W1}}{\tau_{W1} + \tau_{W2}} \cdot T_2(x, t_\infty) \quad (15)$$

- Pro rozložení teploty páry po délce (netopené plochy):

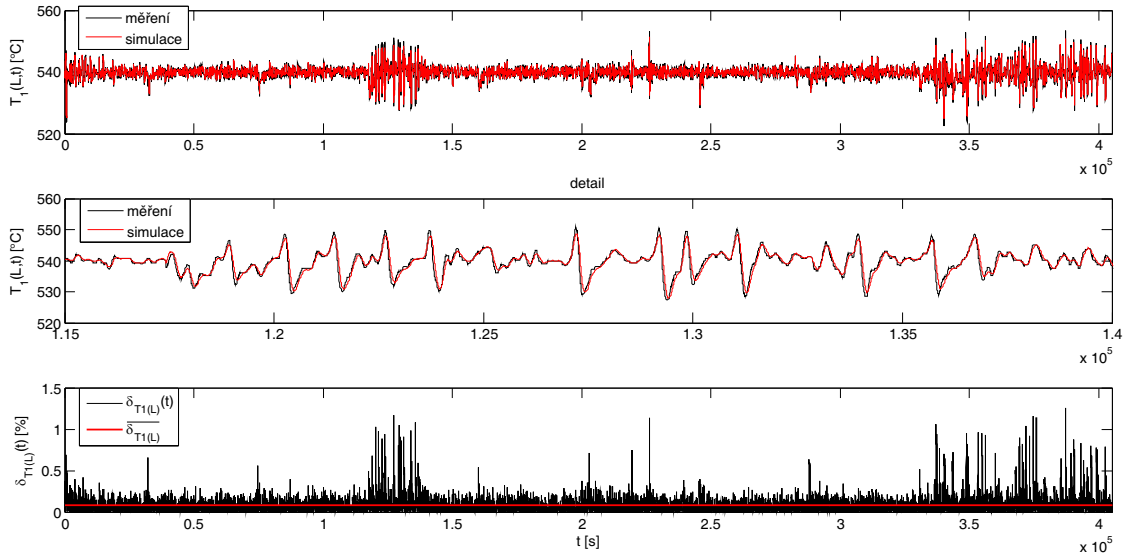
$$\frac{\partial T_1(x, t_\infty)}{\partial x} = \frac{1}{\tau_1 u_1} \cdot (T_W(x, t_\infty) - T_1(x, t_\infty)) = 0 \quad (16)$$

- Pro rozložení teploty stěny po délce (netopené plochy):

$$T_W(x, t_\infty) = T_1(x, t_\infty) \quad (17)$$

Rozložení teploty páry a stěny v ustáleném stavu u matematického modelu netopené plochy je konstantní, jak ukazují rovnice (16) a (17), a tudíž není potřeba se těmito plochami při výpočtu teploty spalin dále zabývat. Pro výpočet virtuální teploty spalin se tedy budou používat pouze rovnice (13) až (15).

Algoritmus výpočtu je obdobný jako při výpočtu hmotnostních průtoků vody M_v a páry M_p . Celý popis algoritmu je uveden v dizertační práci.

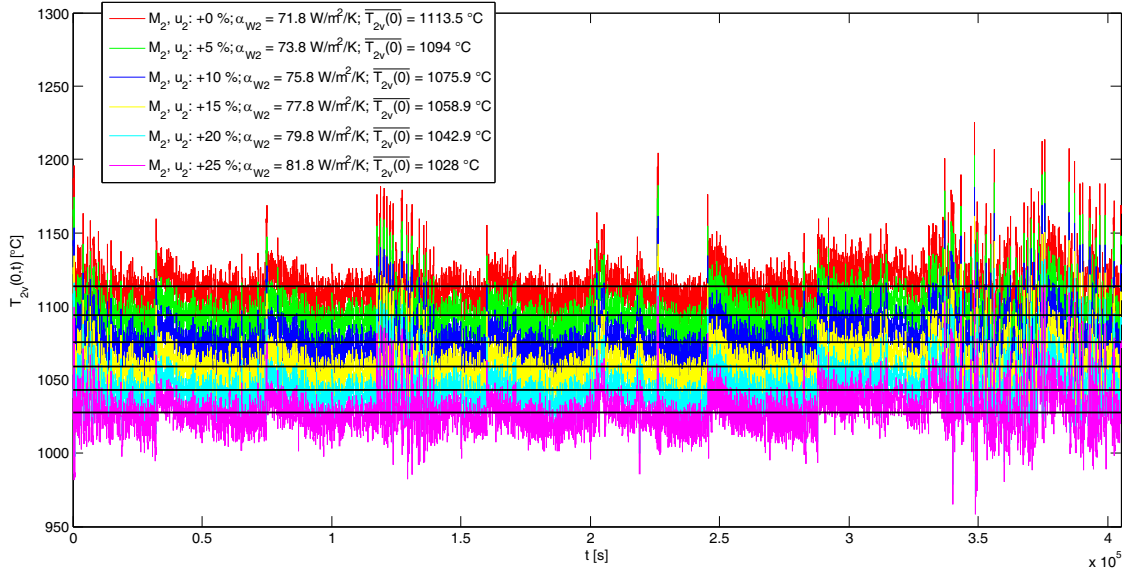


Obrázek 18: Porovnání signálů teplot $T_1(L, t)$ pro model přehříváku s korigovaným parametrem M_1 a vypočteným signálem virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$; $t_a = 63$ s.

Obrázek 18 ukazuje porovnání teplot páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$ mezi měřením a modelem. Při výpočtu teploty spalin bylo aplikováno posunutí teploty páry na výstupu přehříváku v čase $t_a = 63$ s.

Jak ukazuje obrázek 19, změnou parametrů hmotnostního průtoku spalin M_2 a rychlosti spalin u_2 se změní i střední hodnota signálu virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$. Spolu se změnou množství spalin M_2 a rychlosti spalin u_2 se mění i koeficient přestupu tepla mezi stěnou a spalinami α_{W2} , který lze vyčíst z nomogramu v [1].

Střední hodnota signálu virtuální teploty spalin vypočteného za pomoci matematického modelu souproutého přehříváku páry s parametry uvedenými v příloze dizertační práce vyšla $\overline{T_{2v}(0)} = 1113,5$ °C. Tato hodnota výrazně převyšuje hodnotu $T_2(0)$ uvedenou v technologickém zadání přehříváku. Jak již bylo zmíněno výše, signál virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$ v sobě zahrnuje rovněž změny se hmotnostní průtok spalin $M_2(t)$ a rychlost spalin $u_2(t)$ v čase. Změnou těchto parametrů o 25 % spolu s patřičnou změnou koeficientu přestupu tepla na straně spalin α_{W2} se lze dostat až na $\overline{T_{2v}(0)} = 1028$ °C. Tato teplota se blíží k teplotě, uvedené ve výkresu kotle, kde je uvedena teplota 990 °C. Střední hodnota virtuální teploty spalin $T_{2v}(0, t)$ je především výrazně ovlivňována koeficientem přestupu tepla α_{W2} .



Obrázek 19: Porovnání signálů virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$ pro různé parametry modelu přehříváku na straně spalín.

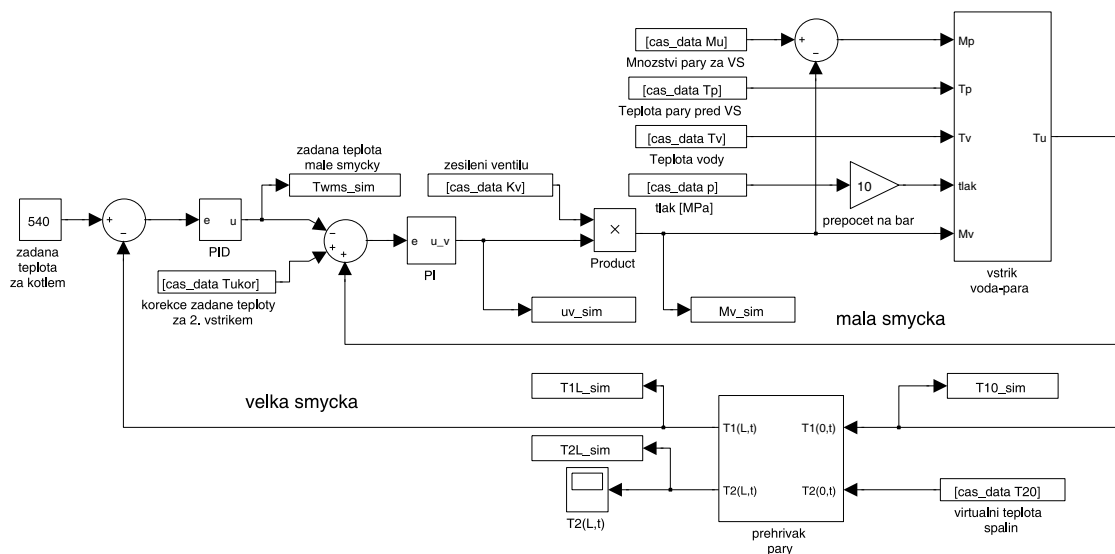
5.3 Testování regulačního obvodu přehříváku páry

Celý model regulačního obvodu přehříváku páry ukazuje obr. 20. Na tento regulační obvod byly přivedeny signály potřebné pro provoz malé regulační smyčky spolu s vypočteným průběhem virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$ a signálem korekce žádané teploty na vstupu přehříváku $T_{ukor}(t)$.

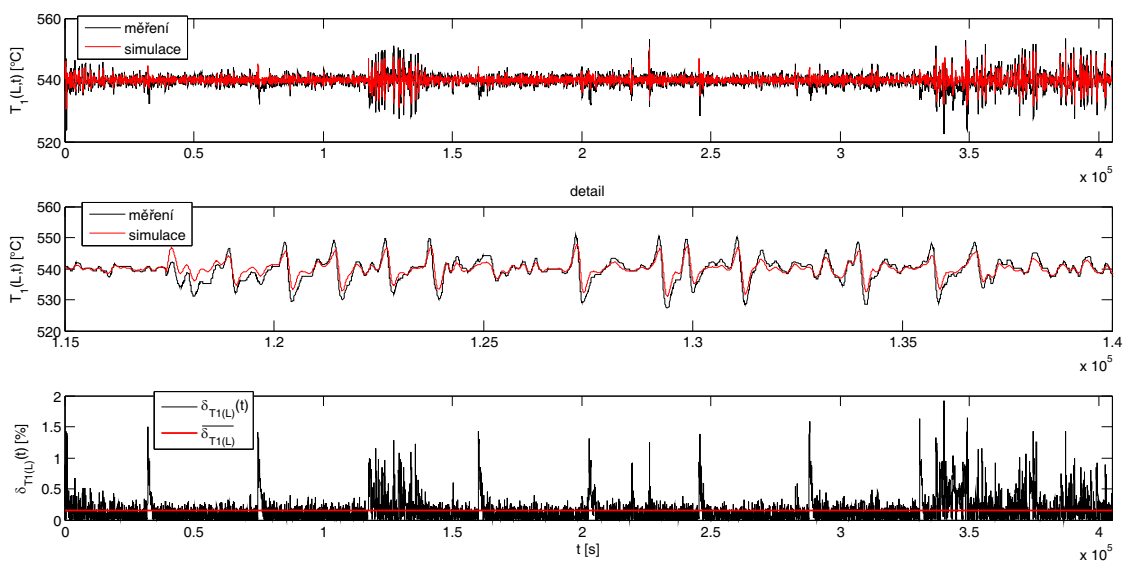
Porovnání měřených provozních signálů a výsledků simulace ukazují obrázky 21 a 22. Zbytek porovnání je uveden v dizertační práci. Z těchto signálů byly vypočteny relativní chyby mezi měřením a simulací. Střední hodnoty těchto relativních chyb byly:

- pro teplotu páry na výstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_1(L)}} = 0,1512 \%$
- pro teplotu páry na vstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_1(0)}} = 0,2634 \%$
- pro žádanou hodnotu teploty na vstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_{wms}}} = 0,2661 \%$
- pro procento otevření ventilu $\overline{\delta_{u_v}} = 2,3769 \%$
- pro hmotnostní průtok vody $\overline{\delta_{M_v}} = 2,3769 \%$

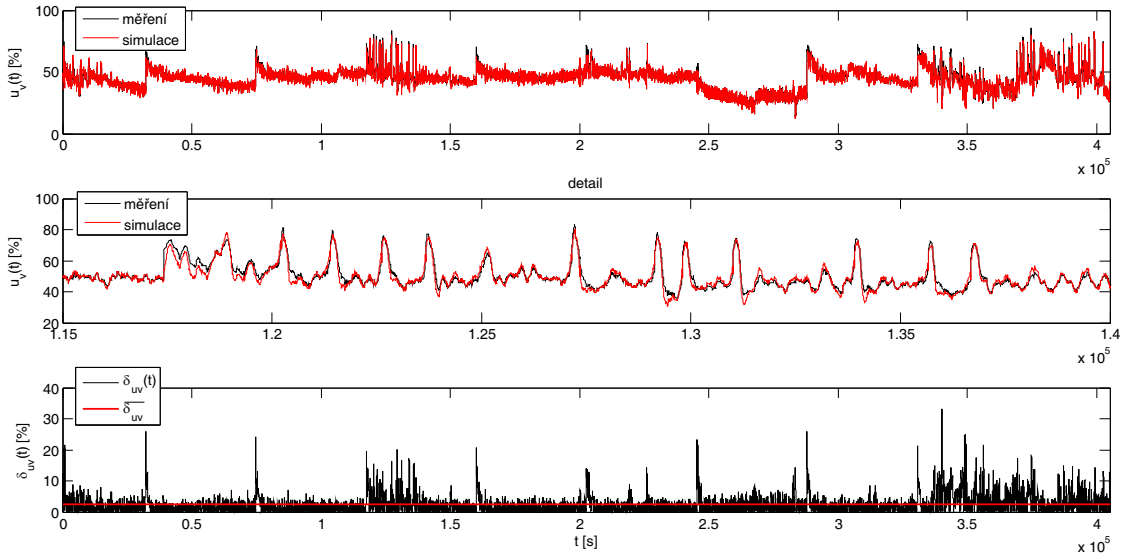
Při porovnání průběhu na obr. 18, jenž ukazuje výsledky simulace přehříváku páry vyčleněného z regulačního obvodu a průběhu na obr. 21, jenž ukazuje výsledky simulace přehříváku začleněného v regulačním obvodu přehříváku páry, se projevíly rozdíly mezi vypočtenými teplotami $T_{lsim}(L, t)$.



Obrázek 20: Regulační obvod přehříváku páry v Simulinku.



Obrázek 21: Porovnání teplot $T_1(L)$ pro obr. 20.



Obrázek 22: Porovnání signálů procenta otevření ventilu pro obr. 20.

Rozdíly mezi výsledky simulací spočívají v neznalosti provozního signálu působícího v regulačním obvodu. Tento signál je v dokumentaci k regulaci výstupního přehříváku páry označen jako **korekce teploty přehřáté páry** a je přičítán k žádané hodnotě teploty na výstupu kotle T_{wvs} (viz obr. 8 v kapitole 4). Signál korekce teploty přehřáté páry (dále označený $T_{wvskor}(t)$), lze dopočíst na základě znalosti struktury a parametrů regulátoru velké smyčky, signálu teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$ a signálu akční veličiny regulátoru velké smyčky, kterou představuje signál žádané hodnoty teploty páry na vstupu přehříváku $T_{wms}(t)$. Regulátor velké smyčky je zapsán v multiplikativním tvaru, jak popisuje rovnice (18):

$$H_{RVS}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right), \quad (18)$$

kde $k_p = 1.2$, $T_i = 200$ s, $T_d = 15$ s, $T_f = 15$ s.

Parametry tohoto regulátoru jsou v oblasti ustáleného provozního režimu elektricky konstantní, jak již bylo zmíněno v kapitole 4. Přivedením signálu $T_{wms}(t)$ na vstup inverzního přenosu regulátoru $H_{RVS}^{-1}(s)$ se získá průběh regulační odchylky $T_{evs}(t)$. Signál korigované teploty přehřáté páry $T_{wvskor}(t)$ se poté vypočte dle vztahu (19).

$$T_{wvskor}(t) = T_1(L, t) + T_{evs}(t) - T_{wvs}(t) \quad (19)$$

Obrázek 23 ukazuje model regulačního obvodu výstupního přehříváku páry, kde je výpočet hmotnostního průtoku vody prováděn za pomoci časově proměnného

The diagram illustrates a boiler control system with two feedback loops:

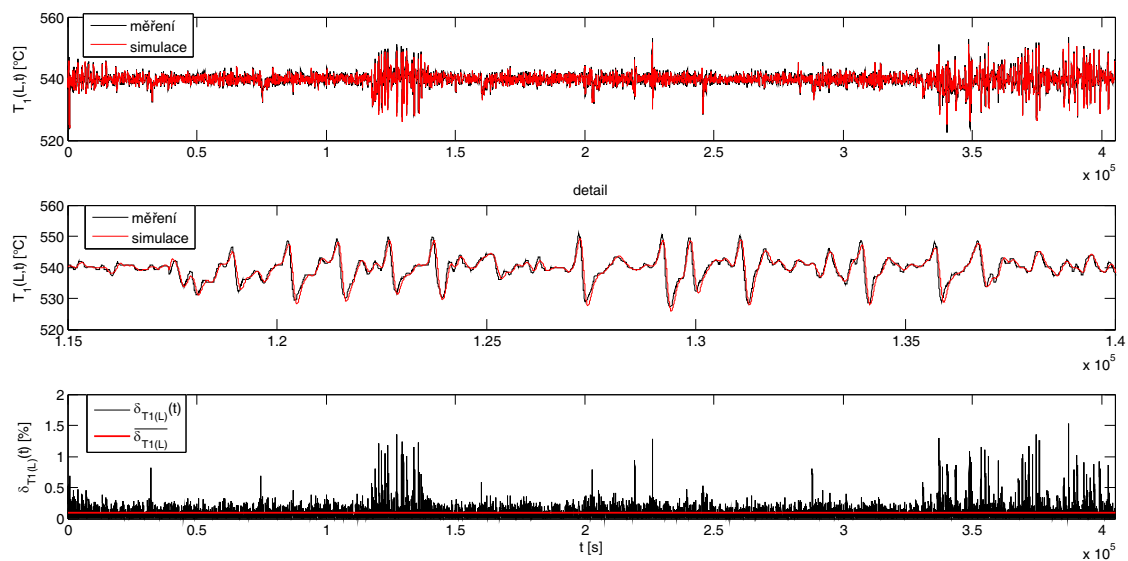
- Small Loop (mala smyčka):** This loop controls the steam pressure. It starts with a setpoint of 540 (labeled "zadana teplota za kotlem"). This is compared with the measured steam pressure (Mv) at a summing junction. The resulting error signal (e) is processed by a PID controller. The output of the PID is compared with the measured steam temperature (Tv) at another summing junction. The error signal from this junction is then processed by a PI controller. The output of the PI controller is multiplied by the valve opening signal (Kv) at a "Product" block. The final output is the valve position (uv_sim), which is fed back to the steam pressure measurement (Mv).
- Large Loop (velka smyčka):** This loop controls the boiler water level. It starts with a setpoint of 540 (labeled "zadana teplota za kotlem"). This is compared with the measured water level (Mv) at a summing junction. The resulting error signal (e) is processed by a PID controller. The output of the PID is compared with the measured steam temperature (Tv) at another summing junction. The error signal from this junction is then processed by a PI controller. The output of the PI controller is multiplied by the valve opening signal (Kv) at a "Product" block. The final output is the valve position (uv_sim), which is fed back to the steam pressure measurement (Mv).

Additional components and signals include:

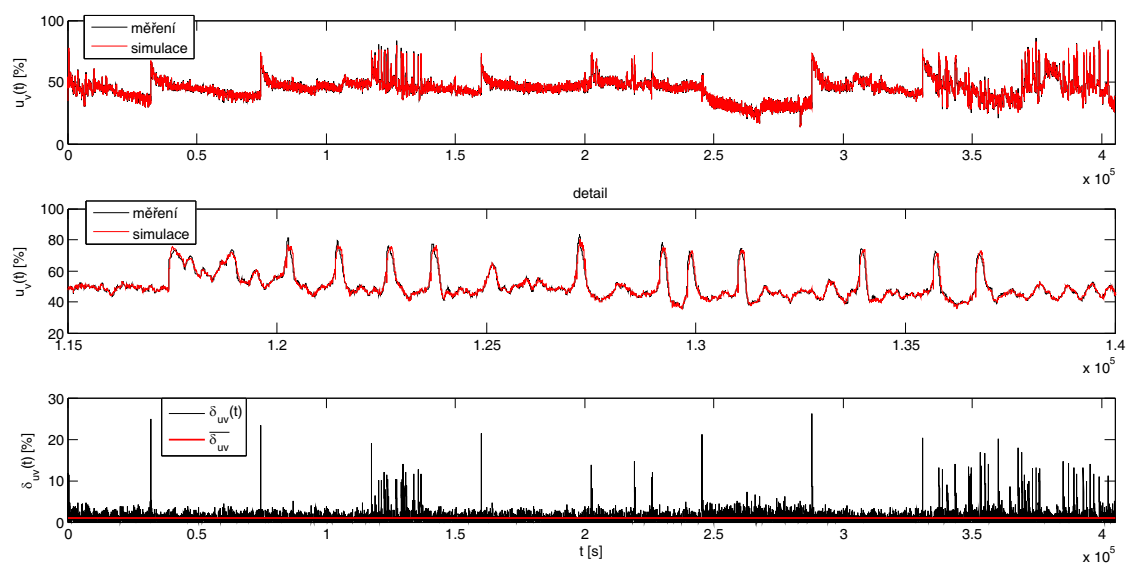
- Inputs:** [cas_data Mu] (mass flow rate), [cas_data Tp] (temperature before valve), [cas_data Tv] (steam temperature), [cas_data p] (pressure), [cas_data Twvskor] (correction for 2nd injection), [cas_data Twvskor] (correction for boiler temperature), [cas_data T20] (virtual flue gas temperature).
- Outputs:** Mp (mass flow rate), Tp (temperature before valve), Tv (steam temperature), tlak (pressure), Mv (water level), vstrik voda-para (water-steam injection).
- Intermediate Signals:** Twms_sim (small loop temperature), u_v (valve position), uv_sim (valve position), Mv_sim (water level), T1(L,t), T1(0,t), T2(L,t), T2(0,t) (temperatures at different points in the boiler).

Porovnání měřených provozních signálů a výsledků simulace ukazují obrázky 24 a 25. Zbytek porovnání je uveden v dizertační práci. Z těchto signálů byly vypočteny relativní chyby mezi měřením a simulací. Střední hodnoty těchto relativních chyb vyšly:

- Vzhledem k tomu, že hmotnostní průtok vody M_v je závislý na časové proměnném zesílení $K_v(t)$, nelze takto sestrojený obvod použít na jinou sadu dat. Z toho důvodu byl přímý výpočet množství vstříkované vody pomocí zesílení $K_v(t)$ nahrazen odpovídajícím modelem, představujícím polynomiální závislost z obrázku 11.



Obrázek 24: Porovnání teplot $T_1(L)$ pro obr. 23.



Obrázek 25: Porovnání signálů procenta otevření ventilu pro obr. 23.

The diagram illustrates a boiler control system with two feedback loops:

- Small Loop (mala smyčka):** This loop controls the steam pressure. It starts with a setpoint of 540 (labeled "540" and "zadaná teplota za kotlem"). This is compared with the measured steam pressure $P(u)$ (labeled "O(P) = 4" and "Ventil"). The resulting error signal $e_{u,v}$ is processed by a PI controller. The output of the PI controller is compared with the measured steam pressure to produce the control signal u , which is then used by a valve actuator $P(u)$ to control the valve. The output of the valve actuator is the steam pressure $P(u)$, which is also used to calculate the steam flow M_p and the steam temperature T_p .
- Large Loop (velka smyčka):** This loop controls the water temperature. It starts with a setpoint of 540 (labeled "540" and "zadaná teplota za kotlem"). This is compared with the measured water temperature T_v (labeled "Teplota vody" and "tlak (MPa)"). The resulting error signal is processed by a PID controller. The output of the PID controller is compared with the measured water temperature to produce the control signal u , which is then used by a valve actuator $P(u)$ to control the valve. The output of the valve actuator is the water temperature T_v , which is also used to calculate the water flow M_v and the water temperature T_v .

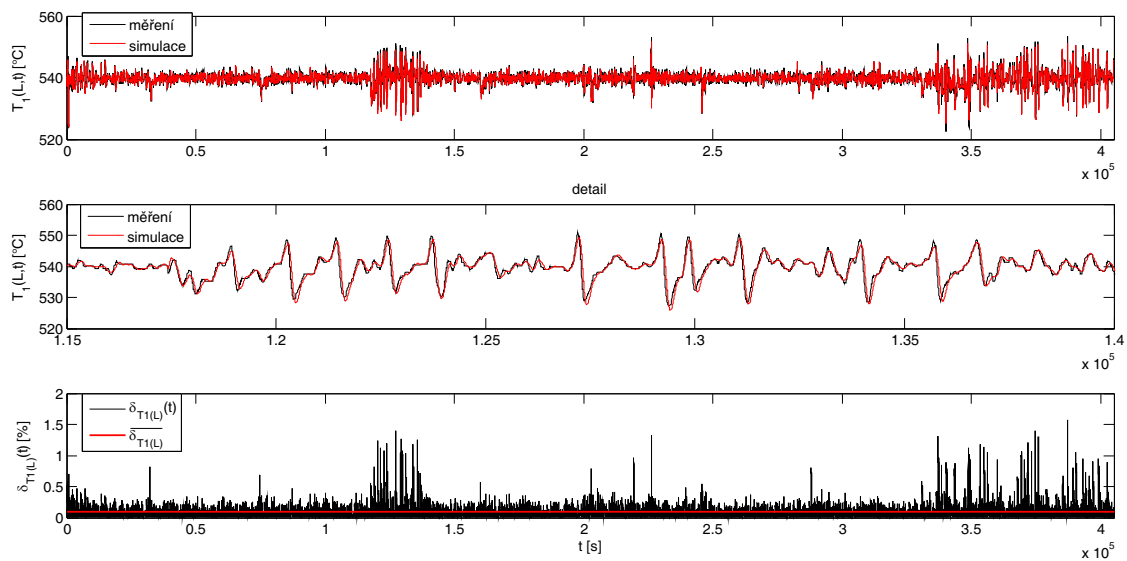
Additional components and signals include:

- Inputs:** $[cas_data\ Mu]$, $[cas_data\ Tp]$, $[cas_data\ Tv]$, $[cas_data\ p]$, $[cas_data\ Twvskor]$, $[cas_data\ T20]$.
- Outputs:** M_p , T_p , T_v , $tlak$, M_v , $T1(L,t)$, $T1(0,t)$, $T2(L,t)$, $T2(0,t)$.
- Intermediate Signals:** $e_{u,v}$, u , $u_{v,v}$, uv_sim , Mv_sim , $Twms_sim$, $T1L_sim$, $T10_sim$, $T2L_sim$, $T2(L,t)$.
- Controllers:** PID, PI.
- Actuators:** $P(u)$, $O(P) = 4$, uv_sim , Mv_sim .
- Process:** $P(u)$, $O(P) = 4$, uv_sim , Mv_sim .
- Disturbances:** $Twms_sim$, uv_sim , Mv_sim .
- Labels:** "zadaná teplota za kotlem", "zadaná teplota male smycky", "korekce zadané teploty za 2. vstrikem", "korekce zadané teploty za kotlem", "mala smyčka", "velka smyčka", "prepočet na bar", "vstrik voda-para", "prehrievak pary", "virtuální teplota spalín".

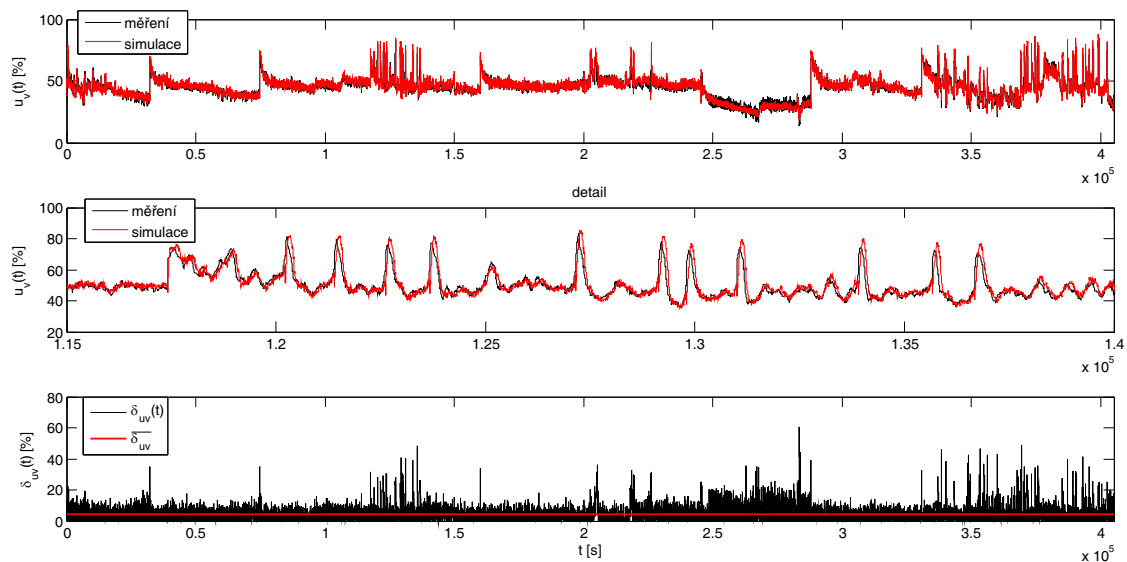
Porovnání měřených provozních signálů a výsledků simulace ukazují obrázky 27 a 28. Zbytek porovnání je uveden v dizertační práci. Z těchto signálů byly vypočteny relativní chyby mezi měřením a simulací. Střední hodnoty těchto relativních chyb vyšly:

- pro teplotu páry na výstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_1(L)}} = 0,0990 \%$
- pro teplotu páry na vstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_1(0)}} = 0,1303 \%$
- pro žádanou hodnotu teploty na vstupu přehříváku $\overline{\delta_{T_{wms}}} = 0,1219 \%$
- pro procento otevření ventilu $\overline{\delta_{uv}} = 1,2022 \%$
- pro hmotnostní průtok vody $\overline{\delta_{M_v}} = 4,1393 \%$

24



Obrázek 27: Porovnání teplot $T_1(L)$ pro obr. 26.



Obrázek 28: Porovnání signálů procenta otevření ventilu pro obr. 26.

adekvátnosti modelu regulačního obvodu. Střední hodnoty relativních chyb pro teploty $T_1(0)$ a T_{wms} se zvedly nepatrně.

6 Diskuze výsledků

Výsledky simulací matematického modelu přehříváku páry zapojeného v regulačním obvodu byly porovnávány na základě střední hodnoty relativní chyby mezi měřeným a simulovaným signálem teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$. Tento způsob porovnání sloužil pro rychlé zhodnocení progresu modelu regulačního obvodu přehříváku.

Nejběžnější metodou vyhodnocení adekvátnosti matematického modelu přehříváku páry je střední kvadratické kritérium, které předpokládá minimalizaci ztrátové funkce

$$J = \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (T_M[k] - T_S[k])^2, \quad (20)$$

kde $T_S[k]$ jsou hodnoty teploty vypočtené modelem při simulaci, které vztahujeme k měřeným hodnotám $T_M[k]$ [9].

Kvalitnější porovnání dekomponuje toto kritérium na tři složky, popsané v [10]. Takto rozložené kritérium, nazvané v [10] kritérium kvality predikce (MSEP – mean square error of prediction) popisuje vztah (21)

$$MSEP = (\overline{T_M} - \overline{T_S})^2 + (s_S - r s_M)^2 + (s_S - r^2) s_M^2, \quad (21)$$

kde

- $\overline{T_M}$ je střední hodnota měřené teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L)$,
- $\overline{T_S}$ je střední hodnota simulované teploty páry na výstupu přehříváku $T_{1sim}(L)$,
- s_M je směrodatná odchylka, vypočtená z T_M ,
- s_S je směrodatná odchylka, vypočtená z T_S ,
- r je korelační koeficient.

Jednotlivé sčítance ve vztahu (21) představují chybu v centrální tendenci (posunutí střední hodnoty), chybu regrese (pracuje se s odchylkami směrnice regresní křivky od 1) a chybu rušení (náhodné chyby) [10].

Podělením jednotlivých sčítanců ve vztahu (21) ztrátovou funkcí J získáme tři různé složky kritéria.

$$UM = \frac{(\overline{T_M} - \overline{T_S})^2}{J} \quad (22)$$

$$UR = \frac{(s_S - r s_M)^2}{J} \quad (23)$$

$$UD = \frac{(s_S - r^2) s_M^2}{J} \quad (24)$$

UM představuje podíl chyby posunutí, UR představuje podíl chyby regrese a UD představuje podíl chyby rušení. Podíly chyby posunutí UM a chyby regrese UR jsou přímo úměrné predikované chybě, která vzniká systematickým podhodnocením nebo z průměru proměnné, která je predikována. Podíl chyby rušení UD je přímo úměrný náhodné chybě predikce. Podíly chyb posunutí a regrese tedy určují zdroje systematických chyb, které by model měl být schopen odstranit s rostoucím časem a podíl chyby rušení pochází z nesystematických chyb.

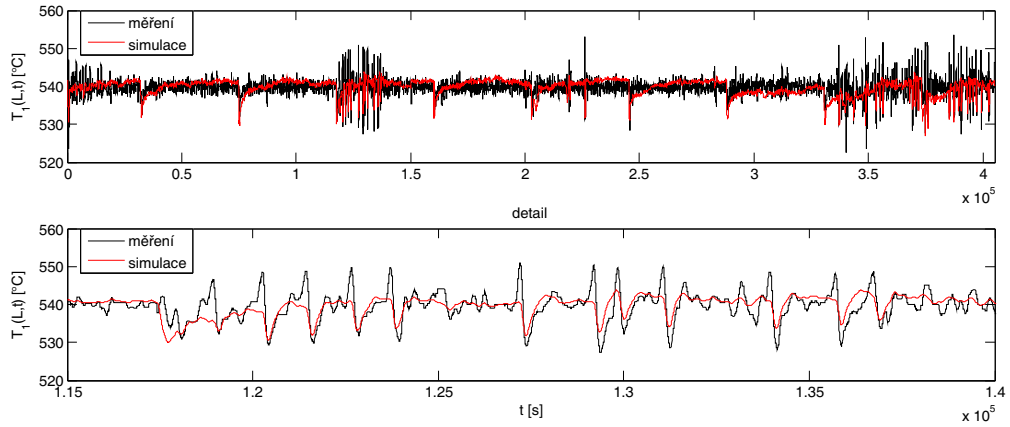
Jestliže je predikce matematického modelu optimální, systematické komponenty (UM , UR) by se neměly významně vzdalovat od nuly a nesystematická komponenta UD by se neměla významně oddalovat od jedničky [10].

$T_2(0)$	J	UM	UR	UD
919,1 °C	915,95	0,9941	0,0013	0,0046
1113,5 °C	5,487	0,0010	0,2276	0,7714

Tabulka 1: Vyhodnocení adekvátnosti modelu přehříváku páry buzeného konstantním signálem teploty spalín.

Použitím vztahů (20) a (22) až (24) byla ověřena nejprve adekvátnost matematického modelu přehříváku, na který byl přiveden signál teploty páry $T_1(0, t)$ a konstantní signál teploty spalín $T_2(0) = 919,1$ °C (viz obr. 16). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 1 v prvním řádku. Druhý řádek v tabulce popisuje tentýž experiment s tím rozdílem, že na vstup teploty spalín byla přivedena konstantní teplota $T_2(0) = 1113,5$ °C, která odpovídá střední hodnotě signálu virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$, vypočteného pro nekorigované parametry na straně spalín (viz obr. 19). Z uvedených výsledků lze vypožorovat značné zvýšení podílu chyby rušení UD a snížení kvadratické chyby J , což naznačuje adekvátnost použití modelu přehříváku páry v regulačním obvodu, jak dokládá také obr. 29.

Tabulka 2 shrnuje výsledky simulací regulačního obvodu ukázaného na obr. 23. Na přehřívák páry byl přiveden signál virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$, jenž v sobě zahrnuje další měnící se parametry v čase, jakými jsou množství spalín M_2 a rychlost spalín u_2 spolu se součinitelem přestupu tepla α_{W2} . Zvyšováním těchto parametrů se přesnost modelu zvyšuje. Přivedením signálu virtuální teploty spalín



Obrázek 29: Porovnání signálů teplot $T_1(L, t)$ pro model přehříváku s korigovaným parametrem M_1 a konstantní teplotou $T_2(0) = 1113,5$ °C.

korekce	M_2 [kg/s]	u_2 [m/s]	α_{W2} [W/m ² /k]	J [°C ²]	UM [—]	UM [—]	UD [—]
0 %	98,23	4,9	71,8	0,6241	$1,4201 \cdot 10^{-8}$	0,0138	0,9862
5 %	103,14	5,145	73,8	0,6159	$1,2788 \cdot 10^{-8}$	0,0125	0,9875
10 %	108,05	5,39	75,8	0,6081	$1,2343 \cdot 10^{-8}$	0,0113	0,9887
15 %	112,96	5,635	77,8	0,6007	$9,2991 \cdot 10^{-9}$	0,0102	0,9898
20 %	117,88	5,88	79,8	0,5938	$8,1369 \cdot 10^{-9}$	0,0092	0,9908
25 %	122,79	6,125	81,8	0,5872	$7,4733 \cdot 10^{-9}$	0,0082	0,9918

Tabulka 2: Vyhodnocení adekvátnosti modelu regulačního obvodu přehříváku páry buzeného signálem virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$ – ventil s časově proměnným zesílením $K_v(t)$.

na vstup přehříváku se razantně zvýšila přesnost matematického modelu přehříváku páry a tento mohl být včleněn do výsledného regulačního obvodu přehříváku.

Tabulka 3 shrnuje výsledky simulací regulačního obvodu ukázaného na obr. 26. V regulačním obvodu byl zpátky nahrazen přímý výpočet hmotnostního průtoku vody M_v polynomem. Přesnost takto upraveného modelu se oproti předchozímu modelu nepatrně snížila, jak dokládá tabulka. Tato skutečnost naznačuje, že použitím statické charakteristiky ventilu namísto přímého výpočtu hmotnostního průtoku vody se nedopouštíme velkých chyb a takto aproximovaný ventil lze použít jako součást akčního členu regulátoru malé smyčky.

Pro vyhodnocení matematického modelu regulačního obvodu přehříváku páry prostřednictvím metod statistické dynamiky je nejprve zapotřebí otestovat stacionaritu signálů. Je vyšetřována závislost mezi teplotou páry T_p vstupující do vstříku

korekce	M_2 [kg/s]	u_2 [m/s]	α_{W2} [W/m ² /K]	J [°C ²]	UM [—]	UM [—]	UD [—]
0 %	98,23	4,9	71,8	0,6557	$1,5144 \cdot 10^{-8}$	0,0148	0,9852
5 %	103,14	5,145	73,8	0,6478	$1,3747 \cdot 10^{-8}$	0,0136	0,9864
10 %	108,05	5,39	75,8	0,6388	$1,3079 \cdot 10^{-8}$	0,0123	0,9877
15 %	112,96	5,635	77,8	0,6307	$9,9062 \cdot 10^{-9}$	0,0111	0,9889
20 %	117,88	5,88	79,8	0,6241	$8,8789 \cdot 10^{-9}$	0,0101	0,9899
25 %	122,79	6,125	81,8	0,6163	$8,1573 \cdot 10^{-9}$	0,0091	0,9909

Tabulka 3: Vyhodnocení adekvátnosti modelu regulačního obvodu přehříváku páry buzeného signálem virtuální teploty spalín $T_{2v}(0, t)$ – ventil nahrazen polynomem 4. stupně.

a teplotou páry na výstupu přehříváku $T_1(L)$ (viz obr. 8).

Slabě stacionární stochastický signál, pro který lze použít [7] Wienerův–Hopfovův vztah, představující stochastickou formulaci dynamického systému, by měl pro libovolný čas τ splňovat následující dvě podmínky [5]:

- střední hodnota stochastického procesu $E(x_i) = E(x_{i+\tau})$ je konstantní,
- vzájemná korelace mezi dvěma stochastickými procesy se rovná korelaci mezi týmiž procesy, posunutými o čas τ : $E(x_i \cdot x_j) = E(x_{i+\tau} \cdot x_{j+\tau})$.

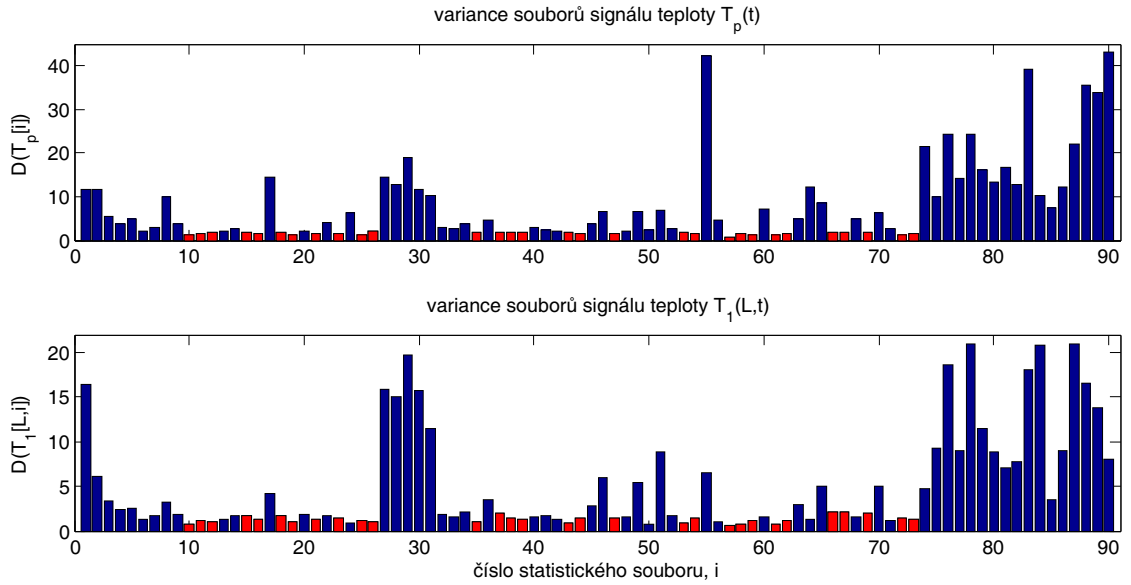
Stochastickým procesem se míní jedna realizace měření na regulačním obvodu výstupního přehříváku kotle. Celkově byl získán statistický soubor dat o délce $N_d = 135091$ vzorků. Tento soubor byl rozdělen na 90 úseků o délce 1500 vzorků dat. Každý tento úsek představuje jednu realizaci stochastického procesu.

První podmínku ověření stacionarity stochastického procesu lze obejít prostřednictvím odtrendování jednotlivých stochastických procesů. Toto lze provést za předpokladu, že zpracovávaná data slouží k odhadnutí impulsové charakteristiky a z těchto dat se počítají centrované korelační funkce – kovarianční funkce. Druhou podmínku je možno zrealizovat vyřazením úseků dat ze statistického souboru, kde se rozptyl jednotlivých úseků značně odlišuje (viz obr. 30).

Pro další zpracování byly vybrány červeně označené úseky. Jejich počet je 30, což znamená, že pro další zpracování je k dispozici 45000 vzorků dat. Střední hodnota rozptylu teploty páry před vstřikem T_p u takto vybraných dat vyšla $(1,5700 \pm 0,2716)$ °C². Střední hodnota rozptylu teploty páry na výstupu přehříváku $T_1(L)$ u takto vybraných dat vyšla $(1,2962 \pm 0,3944)$ °C².

Korelační koeficient mezi měřeními teplotami T_p a $T_1(L)$ vyšel 0,0760 a mezi měřeními teplotami $T_1(0)$ a $T_1(L)$ vyšel 0,0830.

Pro ověření dynamiky regulačního obvodu je vyšetřována reakce výstupní teploty páry $T_1(L)$ na skokovou poruchu teploty páry T_p . Pro aplikaci Wienerova–Hopfova vztahu je zapotřebí odhadnout vzájemně korelační a autokorelační funkce



Obrázek 30: Variance jednotlivých souborů dat signálů teplot $T_p(t)$ a $T_1(L,t)$.

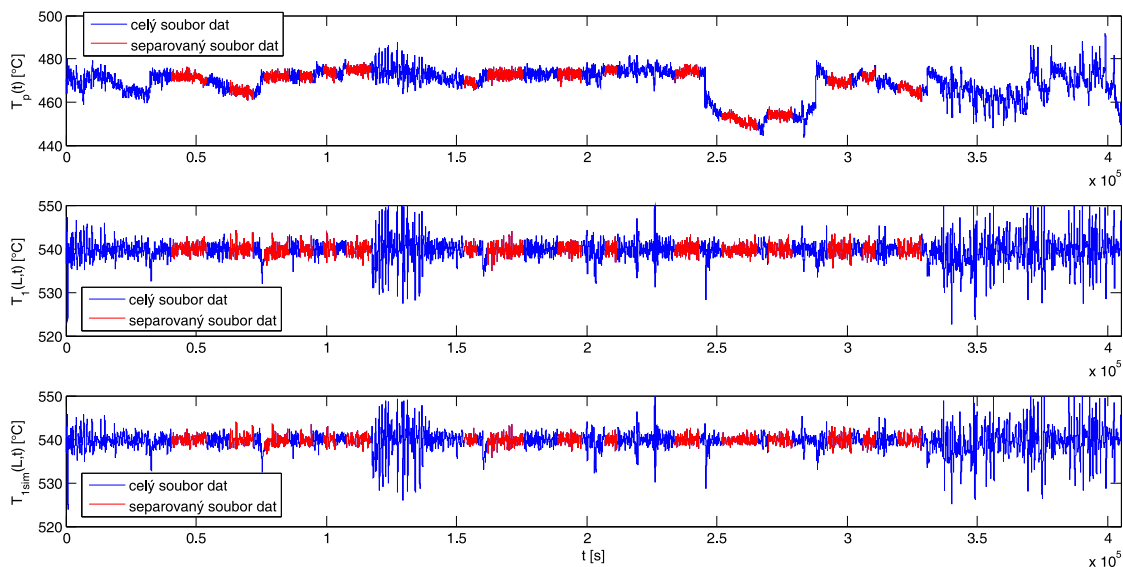
pro vybrané soubory dat. Časový průběh těchto souborů je ukázán na obrázku 31, kde inkriminované soubory dat jsou označeny červeně.

Na tyto soubory dat byla aplikována vlastnost stacionárního signálu – ergodicita. Výpočtem autokorelační funkce $R_p(\tau)$ a vzájemně korelační funkce $R_{p1(L)}(\tau)$ z odtrendovaných statistických souborů a aplikací numerické dekonvoluce byla získána váhová funkce – impulsová charakteristika pro páru $h(t)$. Střední hodnota zpracovávaných statistických souborů je rovna nule, tudíž je splněna první podmínka slabé stacionárnosti signálu. Numerickou integrací impulsové charakteristiky byla získána přechodová charakteristika pro páru $g(t)$ jako reakce teploty páry $T_1(L)$ na skokovou poruchu teplotu páry T_p .

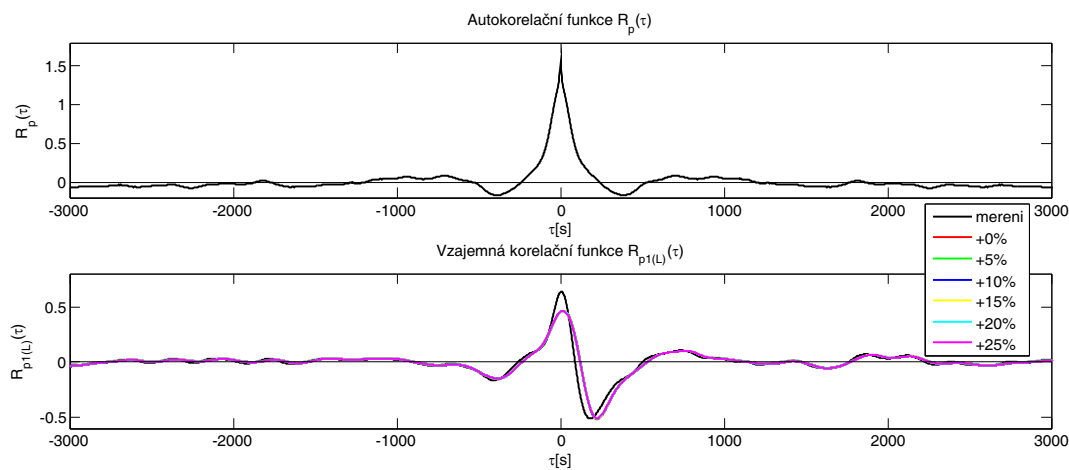
Obrázek 32 ukazuje korelační funkce pro model regulačního obvodu, ukázaného na obr. 23. Obrázek 33 ukazuje impulsovou a přechodovou charakteristiku vypočtenou z korelačních funkcí.

Obrázek 34 ukazuje korelační funkce pro model regulačního obvodu ukázaného na obr. 26. Obrázek 35 ukazuje impulsovou a přechodovou charakteristiku vypočtenou z korelačních funkcí.

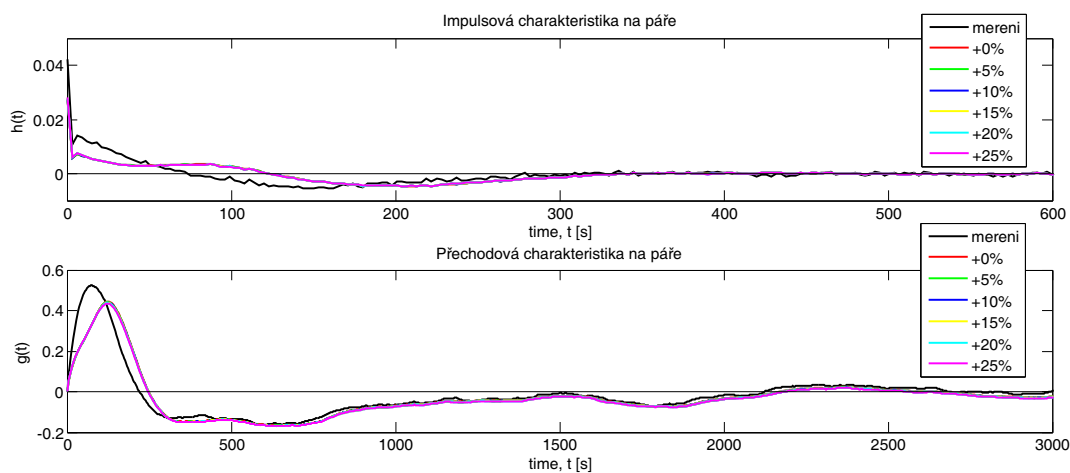
U obou průběhů na obrázcích 33 a 35 lze vidět rozdílnou dynamiku modelu regulačního obvodu oproti měřeným datům. Tento rozdíl je přisuzován přidáním signálu korekce teploty páry na výstupu kotle $T_{wvskor}(t)$, který ačkoliv zvedl rozptyl teploty páry na výstupu přehříváku $T_{1sim}(L)$ a přiblížil tak model regulačního obvodu přehříváku páry realitě, tak ovlivnil reakci celého regulačního obvodu na takto uměle vyrobený signál korekce teploty. Obrázek 36 ukazuje impulsovou a pře-



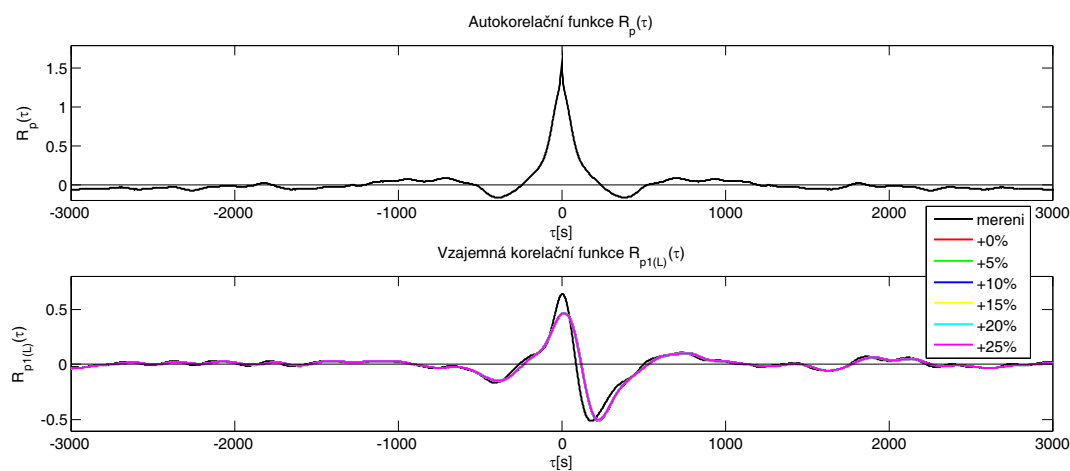
Obrázek 31: Znázornění vybraných souborů dat.



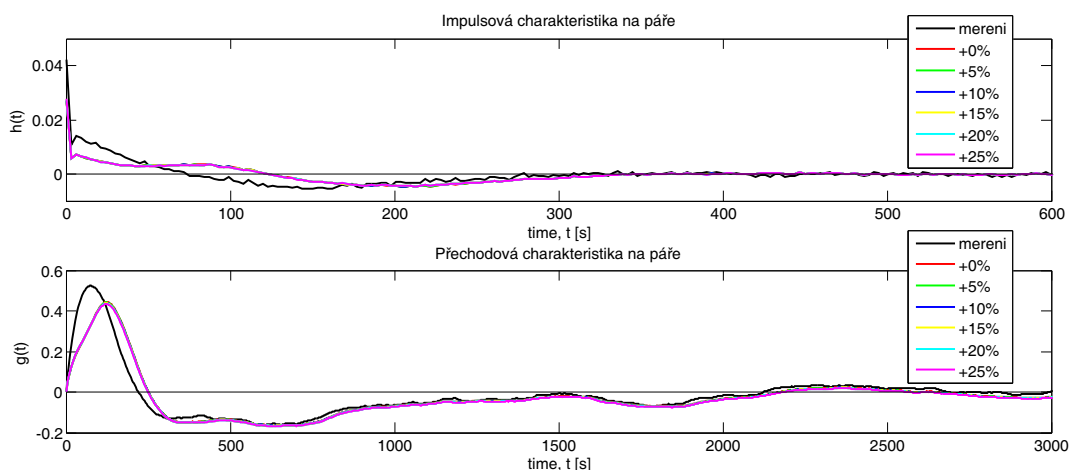
Obrázek 32: Autokorelační a vzájemně korelační funkce signálů teplot pro regulační obvod na obr. 23.



Obrázek 33: Impulsová a přechodová charakteristika pro regulační obvod na obr. 23.

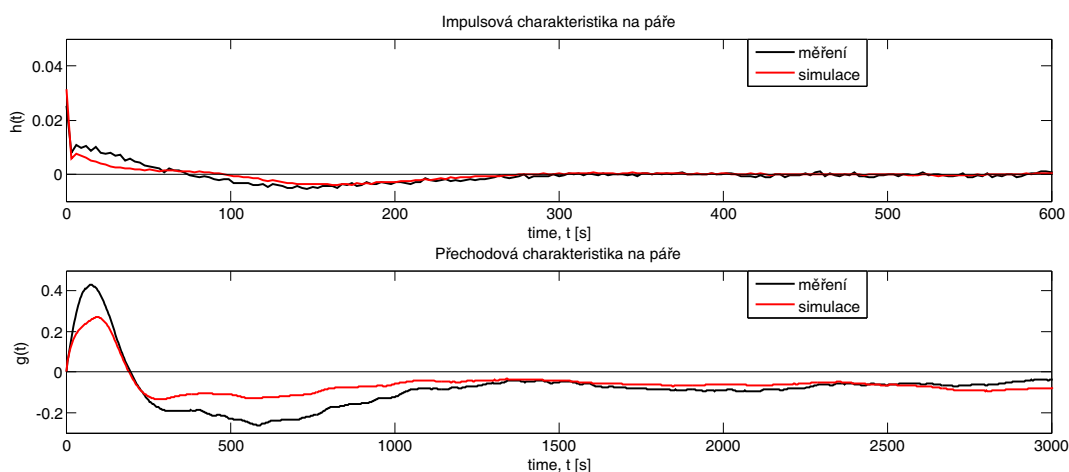


Obrázek 34: Autokorelační a vzájemně korelační funkce signálů teplot pro regulační obvod na obr. 26.



Obrázek 35: Impulsová a přechodová charakteristika pro regulační obvod na obr. 26.

chodovou charakteristiku pro regulační obvod na obr. 20, kde se ještě nevyskytoval signál korekce teploty páry na výstupu kotle $T_{wvskor}(t)$. Zde je vidět neposunutá přechodová charakteristika, vypočtená ze simulace oproti přechodové charakteristice, vypočtené z měřených signálů.



Obrázek 36: Impulsová a přechodová charakteristika pro regulační obvod na obr. 20.

Z obrázků 33 a 35 je patrné, že změnou parametrů matematického modelu výstupního přehříváku páry na straně spalín o 25 % nedochází k významné změně dynamiky modelovaného regulačního obvodu.

7 Závěr

V této dizertační práci byla detailně diskutována metodika modelování vybraných technologických bloků kotle elektrárny Dětmárovice a jejich zapojení do regulačního obvodu. Stěžejním blokem byl výstupní přehřívák páry, jenž byl modelován jako soustava s distribuovanými parametry. Jedním z přístupů, který se z hlediska modelování výstupního přehříváku páry nabízí, je sériové spojení souproutého přehříváku páry a netopených ploch, které slouží k napojení přehříváku páry na další technologické prvky kotle. Oba typy soustav jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi popisujícími výměnu tepla mezi médii skrz stěnu výměníku. Nejsou uvažovány projevy tlaku a rychlosti média na stěnu výměníku a médium samotné. Dalším modelovaným blokem byl vstřík typu voda-pára, který spolu s ventilem tvoří akční člen regulátoru malé smyčky.

Regulační obvod výstupního přehříváku páry byl sestaven na základě poskytnuté dokumentace k regulaci kotle 2. bloku elektrárny. Adaptace parametrů regulačního obvodu na kotel 4. bloku elektrárny byla konzultována s obsluhou tohoto bloku elektrárny.

Všechny výše zmíněné matematické modely byly implementovány jako bloky S-funkce v Simulinku. Tento způsob modelování umožňuje spojovat jednotlivé matematické modely do různých konfigurací a vytvořit tak model příslušného regulačního obvodu. Zároveň odpadá nutnost implementovat numerické metody pro řešení obyčejných diferenciálních rovnic, jelikož prostředí Simulinku disponuje sofistikovanými řešiči určenými pro řešení ODE.

Model regulačního obvodu výstupního přehříváku páry byl testován s reálnými daty, získanými z provozu 4. bloku elektrárny. Progrese tvorby regulačního obvodu je stručně popsána v kapitole 5. V této kapitole se postupně ověřovala malá regulační smyčka, samotný výstupní přehřívák páry a nakonec celý regulační obvod výstupního přehříváku. Simulací samotného výstupního přehříváku páry byly zjištěny nesrovnalosti mezi měřenými průběhy a simulovanými průběhy teploty páry na výstupu přehříváku. Příčinou tohoto stavu bylo nedostatečně přesné zadání technologických parametrů modelu a dále neznalost časového průběhu signálu teploty spalin $T_2(0, t)$.

Technologické parametry modelu souproutého přehříváku páry byly zadány pro teplotu páry na vstupu přehříváku $T_1(0) = 457,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplotu spalin na vstupu přehříváku $T_2(0) = 919,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Přivedením těchto teplot na matematický model přehříváku (viz obrázky 5 a 6) bylo ověřeno, že tento matematický model vypočte ustálenou výstupní teplotu páry $T_{\text{sim}}(L) \doteq 542,5 \text{ }^\circ\text{C}$, což odpovídá rozdílu 0,46 % mezi touto vypočtenou hodnotou a hodnotou uvedenou v tabulce s technologickými parametry.

Přivedením zvýšené konstantní teploty spalin ($T_2(0) = 1113,5 \text{ }^\circ\text{C}$) spolu s měřeným průběhem teploty páry $T_1(0, t)$ na vstup přehříváku byla pomocí statistické analýzy ověřena dobrá shoda matematického modelu přehříváku páry se skutečným přehřívákem (viz tab. 1). Za předpokladu dobře definovaných parametrů modelu

na straně páry a v čase neměnných konstrukčních parametrů přehříváku byl pro měřené signály teploty páry na vstupu přehříváku $T_1(0, t)$ a na výstupu přehříváku $T_1(L, t)$ vypočten signál virtuální teploty spalin na vstupu přehříváku $T_{2v}(0, t)$. Tento signál v sobě zahrnuje fluktuace rychlosti spalin u_2 , množství spalin M_2 a teplotního součinitele přestupu tepla konvekcí na straně spalin α_{W2} .

Použití dopočteného signálu virtuální teploty spalin jak na samotný model přehříváku, tak na regulační obvod s tímto přehřívákem vedlo k zdokonalení přesnosti modelu regulačního obvodu.

Některé signály vyskytující se v regulačním obvodu skutečného kotle bloku elektrárny se při provozu kotle nearchivují. Jedná se zejména o korekce žádaných hodnot malé a velké regulační smyčky. Tyto signály byly dopočteny na základě měřených signálů a matematických modelů jednotlivých prvků regulačního obvodu. Použití dopočteného signálu korekce žádané hodnoty teploty za kotlem T_{wvskor} sice zlepšilo přesnost matematického modelu, ale tento signál ovlivnil dynamiku celého regulačního obvodu. Tuto skutečnost dokládají obrázky 33 a 35, kde došlo k posunutí začátku průběhu přechodové charakteristiky oproti obrázku 36, kde nebyl signál T_{wvskor} aplikován. Vysvětlením může být skutečnost, že při simulaci celého regulačního obvodu se předpokládala konstantní žádaná hodnota teploty páry na výstupu kotle T_{wvs} , která ve skutečnosti nemusí být konstantní po celý den provozu kotle.

Dizertabilním jádrem této práce byl návrh metodiky pro modelování a analýzu statických a dynamických vlastností výstupního přehříváku páry a jednotlivých komponent regulačního obvodu a dále vyhodnocení shody matematického modelu výstupního přehříváku páry a jednotlivých komponent regulačního obvodu s reálnými daty z provozu 200 MW elektrárenského bloku Elektrárny Dětmarovice.

Původním přínosem práce bylo odvození parciálních diferenciálních rovnic popisujících výměnu tepla mezi dvěma médii skrz stěnu výměníku, aplikace metod statistické dynamiky pro analýzu stochastických signálů působících na soustavu s distribuovanými parametry a verifikace modelu regulačního obvodu obsahujícího modely soustav s distribuovanými parametry na reálných datech z provozu skutečného regulačního obvodu.

Řešení této práce bylo umožněno za podpory grantu GA ČR 102/09/1003 „Modelování vysokoteplotních výměníků tepla a využití modelů pro optimální regulaci výměníků.“ a interního grantu IGA BI 4559951 „Aplikace metod statistické dynamiky lineárních systémů“.

Výsledky této práce byly publikovány na několika zahraničních i domácích konferencích včetně dvou zahraničních časopisů, z nichž jeden časopis je indexován v databázi Scopus a zařazení druhého časopisu do této databáze je potvrzeno vydavatelem v řádu měsíců. Tři ze zahraničních konferencí jsou uvedeny v databázích ISI – Web of Knowledge/Scopus. V době odevzdání této práce jsou na téma dizertační práce posuzovány další dva příspěvky na zahraničních konferencích (ETFA '2011, WSEAS MACMESE '11) s důvodným předpokladem indexování v databázi

ISI – Web of Knowledge. Také je elektronicky potvrzeno přijetí a brzké publikování (06-07/2011) příspěvku v impaktovaném časopise *Przegląd Elektrotechniczny* s impakt faktorem 0,196. Zároveň v současnosti probíhá recenzní řízení článku v časopise *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, jenž má impakt faktor 0,291.

Literatura citovaná v autoreferátu dizertační práce

- [1] DLOUHÝ T.: *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, třetí vydání, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7, 212 s.
- [2] FILIPOVÁ B.: *Modelování a regulace rázu pružného média v pružném potrubí*. Dizertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2002.
- [3] HANUŠ B.: Regulační charakteristiky přehříváčů páry u kotlů československé výroby. *Strojírenství*, ročník 11, č. 3, 1961: s. 179–184, ISSN 0039-2464.
- [4] HANUŠ B.; OLEHLA M.; MODRLÁK O.: *Číslicová regulace technologických procesů*. Brno: VUTUM, 2000, ISBN 80-214-1460-X.
- [5] HOFREITER M.: *Identifikace systémů I*. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009, ISBN 978-80-01-04228-1, 202 s.
- [6] IAPWS IF-97: Thermodynamical Properties of Steam and Water, 2007, [cit. 20. 1. 2011] , <<http://www.x-eng.com/>>.
- [7] KAMEN E. W.; SU J. K.: *Introduction to Optimal Estimation*. London: Springer-Verlag, 1999, ISBN 1-85233-133-X.
- [8] MORAVEC P.: *Modelování průtoku stlačitelného média v cévě. jejíž pružnost se mění na závislosti na délce cévy a času (pulsující céva)*. Diplomová práce, VŠB – TU Ostrava, 2002.
- [9] OŽANA Š.: *Měření a modelování dynamických jevů na soustavách tvořených pružnými potrubími*. Dizertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2003.
- [10] POKORNÝ M.; HÁJOVSKÝ R.; VILIMEC L.: Assessment of the Adequacy of Power Plant Superheater Dynamical Model. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, ročník LVI, č. 2, 2010, ISSN 1804-0993, [cit 8. 5. 2011].
URL <<http://www.fs.vsb.cz/transactions/2010-2/1796.pdf>>
- [11] PRONOBIS M.; WOJNAR W.; CZEPELAK J.: Influence of non-uniform heating on the stresses in tubes of superheaters in boilers. *Forschung im Ingenieurwesen*, ročník 69, č. 1, December 2004: s. 29–37, ISSN 0015-7899.

- [12] SHI X.; CHE D.; AGNEW B.; aj.: An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ročník 54, č. 1-3, January 2011: s. 606–615, ISSN 0017-9310.
- [13] STEHLÍK P.: Conventional versus specific types of heat exchangers in the case of polluted flue gas as the process fluid – A review. *Applied Thermal Engineering*, ročník 31, č. 1, January 2011: s. 1–13, ISSN 1359-4311.
- [14] TOMECZEK J.; WACŁAWIAK K.: Two-dimensional modelling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers. *Fuel*, ročník 88, č. 8, August 2009: s. 1466–1471, ISSN 0016-2361.
- [15] ZIMA W.: Numerical modeling of dynamics of steam superheaters. *Energy*, ročník 26, č. 12, December 2001: s. 1175–1184, ISSN 0360-5442.
- [16] ZIMA W.: Mathematical modelling of transient processes in convective heated surfaces of boilers. *Forschung im Ingenieurwesen*, ročník 71, č. 2, June 2007: s. 113–123, ISSN 0015-7899.

Curriculum vitae

Osobní údaje

Jméno:	Ing. Martin Pieš
Datum a místo narození:	10. 6. 1983, Nový Jičín
Adresa trvalého bydliště:	Smetanovy sady 811/9, Nový Jičín 74101
Zaměstnání:	Prezenční doktorand katedry měřicí a řídicí techniky, FEI, VŠB-TUO

Název dizertační práce:

Regulační model přehříváku páry a jeho ověření na elektrárenském bloku 200 MW elektrárny Dětmarovice

Vzdělání

2008	Ing. - VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra měřicí a řídicí techniky, obor Měřicí a řídicí technika, ukončeno s vyznamenáním
2006	Bc. - VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra měřicí a řídicí techniky, obor Řídicí a informační systémy, ukončeno s vyznamenáním

Granty – hlavní řešitel, člen řešitelského kolektivu

- VŠB TU Ostrava, FEI, IGA BI 4559951, 2009, název: Aplikace metod statistické dynamiky lineárních systémů, hlavní řešitel
- GA ČR, ev. č. 102/09/1003, 2009-2011, název: Modelování vysokoteplotních výměníků tepla a využití modelů pro optimální regulaci výměníků, člen řešitelského kolektivu, hlavní řešitel: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.
- MPO ČR, ev. č. FR-TI1/073, 2009-2011, název: Výzkum a vývoj flexibilního energetického systému transformujícího primární energii biomasy i alternativních paliv při jejich spalování, popřípadě odpadní teplo z různých tepelných agregátů na elektrickou energii s možností kogenerace s vyšší účinností, člen řešitelského kolektivu, hlavní řešitel: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.
- Studie pro posouzení možností řešení dynamických vlastností a regulace FES pro Vítkovice a.s., Ostrava, 2008, člen řešitelského kolektivu, hlavní řešitel: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.
- TA ČR, ev. č. TA01020282, 2011-2013, název: Zvyšování ochrany životního prostředí ve vazbě na výskyt endogenních požárů důlních odvalů a skládek

průmyslových odpadů, včetně jejich modelování a predikce šíření, člen řešitelského kolektivu, hlavní řešitel: Prof. Ing. Pavel Nevřiva, DrSc.

- EU, VŠB-TU Ostrava, ev. č. CZ.1.07/2.2.00/15.0113, 2010-2013, název: Inovace oboru měřicí a řídicí technika na FEI, VŠB-TU Ostrava, náplň práce: Animátor, Programátor u předmětů Signály a soustavy, Kybernetika, Regulační systémy, Analýza regulačních systémů, Spoluautor textu u předmětu Signály a soustavy, hlavní řešitel: Doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
- EU, VŠB-TU Ostrava, ev. č. CZ.1.07/2.2.00/07.0339, 2009-2012, název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu, náplň práce: IT technik předmětu Navrhování a realizace regulátorů – Ing. Štěpán Ožana, Ph.D., hlavní řešitel: Doc. RNDr. Jana Šarmanová, CSc.

Výuka

Cvičení v předmětech Signály a soustavy a Číslíkové signály a soustavy.

Publikace autora

Příspěvky týkající se tématu dizertační práce

- Publikace v impaktovaném časopise
 - Ozana, S., Pies, M., Vazquez, L., Nevřiva, P. Aplicación de técnicas de avanzadas con MATLAB & Simulink en la ingeniería de automática en sobrecalentador de una central térmica. In *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*. Probíhá recenzní řízení od 05/2011, ISSN 1697-7912, IF: 0,291
 - Ozana, S., Pies, M., Vazquez, L. Use of Methods of Statistic Dynamics Applied for Analysis of Steam Superheater. In *Przegląd Elektrotechniczny*. Potvrzeno zveřejnění 06-07/2011, ISSN 0033-2097, IF: 0,196
- Publikace se záznamem v databázi ISI-WoK/Scopus
 - Ozana, S., Pies, M. *Modeling and Simulation of Power Plant Superheater in Simulink*. In Proceedings of the International Conference on Circuits, Systems, Signals (CSS'2010). Malta : Institute for Environment, Engineering, Economics and Applied Mathematics. s. 180-183. September 15th - 17th, 2010. ISBN 978-960-474-226-4. ISSN 1792-4324.

- Ozana, S., Pies, M. *Simulation of Power Plant Superheater by Simulink S-functions*. In 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2010). Bilbao, Spain : Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. 1x CD-ROM, September 13th - 16th, 2010. ISBN 978-1-4244-6850-8.
- Ozana, S., Pies, M. *Using Simulink S-Functions with Finite Difference Method Applied for Heat Exchangers*. In MASTORAKIS, Nikos E., et al. RECENT ADVANCES IN SYSTEMS : Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on SYSTEMS. [s.l.] : WSEAS Press, 2009. s. 210-215. July 22th-24th, Rhodes Island, Greece. ISBN 978-960-474-097-0. ISSN 1790-2769.
- Publikace v zahraničním časopise se záznamem v databázi Scopus
 - Nevřiva, P., Ozana, S., Pies, M. Simulation of Power Plant Superheater Using Advanced Simulink Capabilities. In *INTERNATIONAL JOURNAL of CIRCUITS, SYSTEMS and SIGNAL PROCESSING*, pp. 86-93. Issue 1, Volume 5, 2011, dostupný z WWW [cit. 1. 4. 2011]: <http://www.naun.org/journals/circuitssystemssignal/19-545.pdf>, ISSN: 1998-4464.
Ze strany vydavatele je potvrzeno zařazení do databáze v řádu měsíců.
 - Nevřiva, P., Ozana, S., Pies, M., Vilimec, L. Dynamical Model of a Power Plant Superheater. In *WSEAS Transactions on Systems*, pp. 774-783. Issue 7, Volume 9, 2010, dostupný z WWW [cit. 31. 8. 2010]: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/systems/2010/89-878.pdf>, ISSN: 1109-2777.
- Publikace na mezinárodních konferencích
 - Ozana, S., Pies, M. *Modeling and Control of High-Temperature Heat Exchanger*. In TADEUSIEWICZ, Ryszard, et al. CMS'09 : 7th Conference Computer Methods and Systems. Kraków : Oprogramowanie Naukowo-Techniczne, 2009. Session MMCO-T3. s. 253-258. ISBN 83-916420-5-4.
 - Nevřiva, P., Ozana, S., Pies, M. *Identification of mathematical model of a counter-flow heat exchanger by methods of statistic dynamics*. In BURNHAM, Keith J., HAAS, Olivier C. L. Twentieth International Conference on Systems Engineering (ICSE 2009) : Proceedings. Coventry University : Control Theory and Applications Centre, 2009. Regular Oral Presentations. s. 345-350. ISBN 978-1-84600-0294.
 - Nevřiva, P., Ozana, S., Pies, M. *Identification of Mathematical Model of a Parallel-flow Heat Exchanger by Methods of Statistic Dynamics*. In BRADÁČ, Zdeněk, BRADÁČ, František, FIEDLER, Petr. Proceedings

of the International Conference IWCIT'09 : THE EIGHT INTERNATIONAL PHD STUDENTS 1st edition. Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEEC, UAMT, 2009. s. 29-34. ISBN 978-80-214-3949-8.

- Publikace na tuzemské konferenci
 - Pies, M. *Verification of Control Circuit Dynamics of Output Power Plant Superheater by Stochastic Signals*. In WOFEX 2010 Ph.D. Workshop proceedings of the 8th annual workshop. Ostrava : VŠB - TUO 2010. s. 192., September 6th - 7th, 2010. ISBN 978-80-248-2276-1
 - Ožana, Š., Pieš, M. *Modelování souproudého výměníku tepla v Simulinku s využitím s-funkcí*. In Humusoft, s.r.o. Technical Computing Prague 2009 : Sborník příspěvků 17. ročníku konference. Praha : Humusoft, s.r.o., 2009. s. 81. 1x CD-ROM. Kongresové centrum ČVUT, Praha, November 14th, 2009. Dostupný z WWW [cit. 1. 4. 2011]: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/081_pies.pdf, ISBN 978-80-7080-733-0.

Další publikace, netýkající se tématu dizertační práce

- Publikace se záznamem v ISI Proceedings
 - Hajovsky, R., Pies, M. *TRT System for Heat Pumps*. In University of Nevada Las Vegas. Proceedings of Nineteenth International Conference of Systems Engineering (ICSE 2008). August 19th - 21st, 2008. Las Vegas, Nevada. [s.l.] : [s.n.]. Power Systems. s. 109-114. ISBN 978-0-7695-3331-5.
- Publikace na mezinárodních konferencích
 - Ozana, S., Pies, M. *Application of H-infinity Robust Controller on PAC*. In Preprints of IFAC PDeS 2010 - the 10th IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems, 2010, Pszczyna, Poland. Gliwice: Institute of Electronics, Silesian University of Technology, 2010, pp. 149 - 154.
 - Ozana, S., Slanina, Z., Pies, M. *STD Approach for Simulation, Control and Visualization of Color-sorting Machine*. In Preprints of IFAC PDeS 2010 - the 10th IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems, 2010, Pszczyna, Poland. Gliwice: Institute of Electronics, Silesian University of Technology, 2010, pp. 301 - 304.

- Ozana, S., Pies, M. *Educational prototypes of real-time control systems*. In BURNHAM, Keith J., HAAS, Olivier C. L. Twentieth International Conference on Systems Engineering ICSE 2009 : Proceedings. Coventry University : Control Theory and Applications Centre, 2009. Regular Oral Presentations. s. 361-366. ISBN 978-1-84600-0294.
 - Ozana, S., Pies, M. *Design and Implementation of Embedded Systems in Matlab & Simulink Environment*. In SLANINA, Zdenek, SROVNAL, Vilem. Preprints of IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2009. Ostrava : VSB-TU Ostrava, Department of Measurement and Control, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, 2009. Embedded Systems, Microprocessors and Microcontrollers. s. 73-79. February 10th-12th, Roznov pod Radhostem.
 - Ozana, S., Hajovsky, R., Pies, M. *Nonlinear Control Design for Air Levitation of a Ball and its Visualization in Matlab&Simulink&Virtual Reality Toolbox*. In PROSTEAN, Octavian, ANDREESCU, Gheorghe-Daniel, PESCARU, Dan. Proceedings of the 8th International Conference on Technical Informatics-CONTI'2008 : Vol. 1 Automation and Applied Informatics. Timisoara : Editura Politehnica, 2008. Part 2. Modeling, Identification and Parameter Estimation. s. 53-56. ISSN 1844-539X.
- Publikace v tuzemském časopise
 - Ožana, Š., Pieš, M. Koncepce výuky. *Strojárstvo/Strojírenství*. 2008, roč. XII, December 2008, s. 60-61. ISSN 1335-2938.
 - Publikace na tuzemské konferenci
 - Vojčínák, P., Pieš, M., Hájovský, R. *Návrh LQR řízení pro fyzikální model kuličky na tyči*. In Humusoft, s.r.o., Technical Computing Prague 2009 : Sborník příspěvků 17. ročníku konference. Praha : Humusoft, s.r.o, 2009. s. 81. 1x CD-ROM. Kongresové centrum ČVUT, Praha, November 14th, 2009. Dostupný z WWW [cit. 1. 4. 2011]: http://dsp.vscht.cz/onference_matlab/MATLAB09/prispevky/109_vojcinak.pdf, ISBN 978-80-7080-733-0.
 - Ožana, Š., Pieš, M. *Synergický efekt ve výuce automatizace s využitím aplikačních knihoven MATLABu a Simulinku*. In Humusoft, s.r.o. Technical Computing Prague 2008 : Sborník příspěvků 16. ročníku konference. Praha : Humusoft, s.r.o., 2008. s. 79. 1x CD-ROM. Kongresové centrum ČVUT, Praha, November 11th, 2008. Dostupný z WWW [cit. 1. 4. 2011]: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB08/prispevky/079_ozana.pdf, ISBN 978-80-7080-692-0.